

SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikka, Lappeenranta  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Infrarakentaminen ja maa- ja kalliorakennus

Jouni Hyvärinen

## **LUJITUSPULTTIEN JUOTOSMASSAN SITOUTUMINEN**

Opinnäytetyö 2011

# TIIVISTELMÄ

Jouni Hyvärinen

Lujituspulttien juotosmassan sitoutuminen, 47 sivua

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Tekniikka, Rakennustekniikan koulutusohjelma

Infrarakentamisen ja maa- ja kalliorakentamisen suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö, 2011

Ohjaajat: yksikön johtaja Ari Bergström, Yit Rakennus Oy Infrapalvelut, IKR  
yliopettaja Tuomo Tahvanainen, Saimaan ammattikorkeakoulu

Harjateräspultitus on kalliorakentamisessa yleisin, lähes poikkeuksetta käytettävä kalliorakennetta tukeva menetelmä. Harjateräspultituksessa perinteisesti käytettävien materiaalien ominaisuudet ovat hyvin tunnettuja, mutta juotosmassan lisäaineistusta ei edelleenkään osata hyödyntää haettaessa nopeampaa louhintarytmiä tunnelityömailla. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää lisäaineita hyödyntäen juotosmassa, joka saavuttaa mahdollisimman nopeasti lujuuden  $5 \text{ MN/m}^2$  tunneliolosuhteissa. Massan tuli kuitenkin olla riittävän kauan plastista, ettei se työn hetkellisesti keskeytyessä ala sitoutumaan myllyssä tai letkussa. Työ tehtiin YIT Rakennus Oy:n Infrapalvelut / Kalliorakentaminen -yksikölle.

Työ aloitettiin selvittämällä yleisesti kalliorakentamisessa käytettävien sitoutumista kiihdyttävien lisäaineiden ominaisuuksia. Tämän jälkeen valittiin kolme juotosmassan lisäaineeksi soveltuvinta lisäainetta ja suoritettiin ensimmäiset laboratoriokokeet. Laboratoriokokeilla selvitettiin lähinnä massan lujuudenkehitystä ensimmäisen vuorokauden aikana sekä erilaisten lisäaineiden aiheuttamaa lämmönkehitystä sitoutumisreaktiosta johtuen. Ensimmäisten laboratoriokokeiden perusteella valittiin sementtilaatu sekä lisäaine jatkotutkimuksia varten. Työmaalla suoritettiin koepulttien juottaminen, juotetun juotosmassan lämpötilan kehityksen seuranta, tunneliperän räjäytyksestä johtuvien tärinöiden kartoitus, tunnelissa vallitsevien olosuhteitten kartoitus sekä koepulttien vetokoe 28 vuorokauden kuluttua juottamisesta. Tunneliperä räjäytettiin 8 tunnin kuluttua koepulttien juottamisesta. Koepultit sekä tärinänmittausta varten asennetut anturit sijaitsivat 10 metrin, 20 metrin, 30 metrin sekä 40 metrin päässä räjäytetävästä perästä. Työn viimeisessä vaiheessa keskityttiin parantamaan kehitettyä reseptiä työmaalla saatujen tulosten perusteella. Viimeisissä laboratoriokokeissa säädettiin sementin ja runkoaineuksen, sementin ja veden sekä sementin ja lisäaineen keskinäisiä painosuhteita reseptissä juotosmassan ominaisuuksien optimoimiseksi.

Tutkimuksen tulokset osoittavat kehitetyn juotosmassan soveltuvan hyvin kalliorakenteen lujittamiseen juotosmassalla juotetuilla harjateräspulteilla myös kohteissa joissa louhintaa ei voida keskeyttää työvuoroa pitemmäksi ajaksi. Kehitetty juotosmassa mahdollistaa louhinnan jatkumisen pultatun kohteen välittömässä läheisyydessä jo kahdeksan tunnin kuluttua juottamisesta. Laboratoriolosuhteissa juotosmassa kehittää vaaditun  $5 \text{ MN/m}^2$  kuudessa tunnissa loppulujuuden ylittäessä helposti vaaditun  $35 \text{ MN/m}^2$ .

Asiasanat: juotosmassa, lujuudenkehitys, lujituspultti

## ABSTRACT

Jouni Hyvärinen

Cement hardening in bolt grouting, 47 pages

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Civil and Construction Engineering

Bachelor's Thesis 2011

Instructors: Mr. Tuomo Tahvanainen, principal lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

Mr. Ari Bergström, unit manager, YIT Rakennus Ltd, Infrastructure Construction, IKR

The objective of the research was to develop high-early-strength concrete with generally on site used materials. The formula was supposed to be simple enough to be manufactured on construction site. The most important factor for the formula was to gain the strength of  $5 \text{ MN/m}^2$  as fast as possible but still stay plastic long enough for the grouting.

The data for this thesis was collected in two separate laboratory test programmes in the concrete laboratory at Saimaa University of Applied Sciences in Lappeenranta and field tests in YIT tunnelling site at Vantaa. In the empirical part of the study the main concern was to find out the most applicable mixture of grouting cement and accelerator for bolt grouting purpose. Contrary to expectations based on the first laboratory programme, the field tests indicated the grout to be too sandy and the rate of strength to gain too fast. The last laboratory test programme concentrated on developing the grout properties on these problematic areas.

The results of the study show that with the formula developed the grout gains the demanded strength of  $5 \text{ MN/m}^2$  in eight hours in authentic tunnel conditions and is plastic long enough for grouting. The strength test also indicates that the final strength of concrete exceeds the demanded limit strength of  $35 \text{ MN/m}^2$ . Based on this study, it can be recommended to use this developed formula in tunnelling locations where it is essential to gain the demanded strength of concrete in short time.

Keywords: grouting, strength gain

# SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	5
1.1 Yleistä kalliopulteista	5
1.2 Työn tarkoitus	5
1.3 Työn tavoite ja rajaus	5
2 TYÖHÖN LIITTYVÄT AIEMMAT TUTKIMUKSET JA LAATUVAATIMUKSET	6
2.1 VTT:n tiedonanto 27, Kalliopulttien asennus ja laadunvalvonta	6
2.2 INFRARYL	9
2.3 RIL 253-2010	12
2.4 by 50 Betoninormit 2004	13
3 TYÖMAALLA TEHTÄVÄT TUTKIMUKSET	13
3.1 Tunnelissa vallitsevien olosuhteiden kartoitus	13
3.1.1 Tärinämittaukset	13
3.1.2 Kalliomassan lämpötila	27
3.1.3 Juotosmassan lämpötila	27
3.2 Koepulttien juottaminen	30
3.3 Koepulttien vetokokeet	31
3.4 Työmaalla käytettävissä oleva kalusto	33
4 LABORATORIOTUTKIMUKSET	34
4.1 Koekappaleet	34
4.2 Laboratoriossa käytettävät laitteet	34
4.3 Betonimassan runkoaines ja rakeisuuskäyrä	35
4.4 Betonimassat eri resepteillä	35
4.4.1 Käytettävät lisäaineet	40
4.4.2 Vesi-sementtisuhte	41
4.4.3 Sementin ja runkoaineoksen välinen suhde	41
4.5 Koekappaleiden testisarjat	41
4.5.1 Puristuslujuus	41
5 TULOSTEN ANALYSOINTI	41
6 PÄÄTELMÄT	44
KUVAT	45
TAULUKOT	47
LÄHTEET	47

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Yleistä kalliopulteista

Kalliopultit voidaan toimintaperiaatteiltaan jakaa kahteen ryhmään: aktiivisiin sekä passiivisiin kalliopultteihin. Jako perustuu niiden käyttäytymiseen asennushetkellä. Aktiiviset pultit tukevat kalliota heti asennuksen jälkeen. Passiivisen pultin tukivaikutus alkaa vasta kallion liikkuesssa ja kuormittaessa pulttia ja sitä sitovaa juotosmassaa. Tämän vuoksi myös pulttien käyttökohteet vaihtelevat suuresti sen mukaan, kumpaa toimintaperiaatetta pultilta edellytetään; aktiivista pulttia käytetään kohteissa, joissa tarvitaan nopeaa lujitusta ja passiivista pulttia puolestaan kohteissa, joissa pultin sitomisajalla ei ole niin suurta merkitystä. /1/

## 1.2 Työn tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää pääasiallisesti maanalaisessa kalliorakentamisessa käytettävien passiivisten lujituspulttien juotosmassan optimaalinen koostumus sekä kehittää mahdollisimman hyvin soveltuva resepti edellä mainittua käyttötarkoitusta varten. Nykyisellään juotosmassan koostumusta ohjeistavat ainoastaan Valtion Teknillisen tutkimuskeskuksen vuonna 1977 julkaisema tiedonanto 27 sekä vuonna 2006 julkaistu InfraRYL 2006 Infra-rakentamisen yleiset laatuvaatimukset, joka viittaa juotosmassan vaatimuksissa osin myös Suomen Betoniyhdistyksen julkaisuun by 50 Betoninormit 2004. Sekä Tiedonanto 27:ssä että InfraRYL 2006:ssa käsitellään juotosmassan reseptiä melko ylimalkaisesti, joten onkin syytä tarkastella kriittisesti osin jo vanhentunutta ja ristiriitaista ohjeistusta.

## 1.3 Työn tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tärkeimpänä tavoitteena oli kehittää juotosmassa, joka täyttää seuraavat kriteerit:

- Juotettu massa kehittää mahdollisimman nopeasti lujuuden 5 MPa eli 5 MN/m<sup>2</sup>.

- Kehitetty resepti on helppo käyttää myös työmaaolosuhteissa.
- Juotosmassan loppulujuus on riittävä.
- Juotosmassa on plastista työsuoritukseen vaadittavan ajan.
- Juotosmassan hinnan on oltava edullinen.

Työ rajattiin opinnäytetyön aloituspalaverissa käsittelemään ainoastaan markkinoilla jo olevia tuotteita ja niiden yhdistelmiä. Työn tärkeänä osana oli kartoittaa louhittavassa tunnelissa vallitsevat todelliset olosuhteet niiden mahdollista myöhempää, laboratoriossa tapahtuvaa simulointia varten. Tunnelissa mitattiin louhinnasta johtuvat värinät neljällä anturilla. Lähin anturi MP1 oli 10 metrin päässä räjäytettävästä perästä, MP2 20 metrin, MP3 30 metrin ja MP4 40 metrin päässä. Juotosmassan sekä kalliomassan lämpötilaa seurattiin kolmen vuorokauden ajan juottamisesta. Värinämittausten yhteydessä juotettiin myös koepultit veto-koetta varten värinämittaustureitten välittömään läheisyyteen.

## **2 TYÖHÖN LIITTYVÄT AIEMMAT TUTKIMUKSET JA MÄÄRÄYKSET**

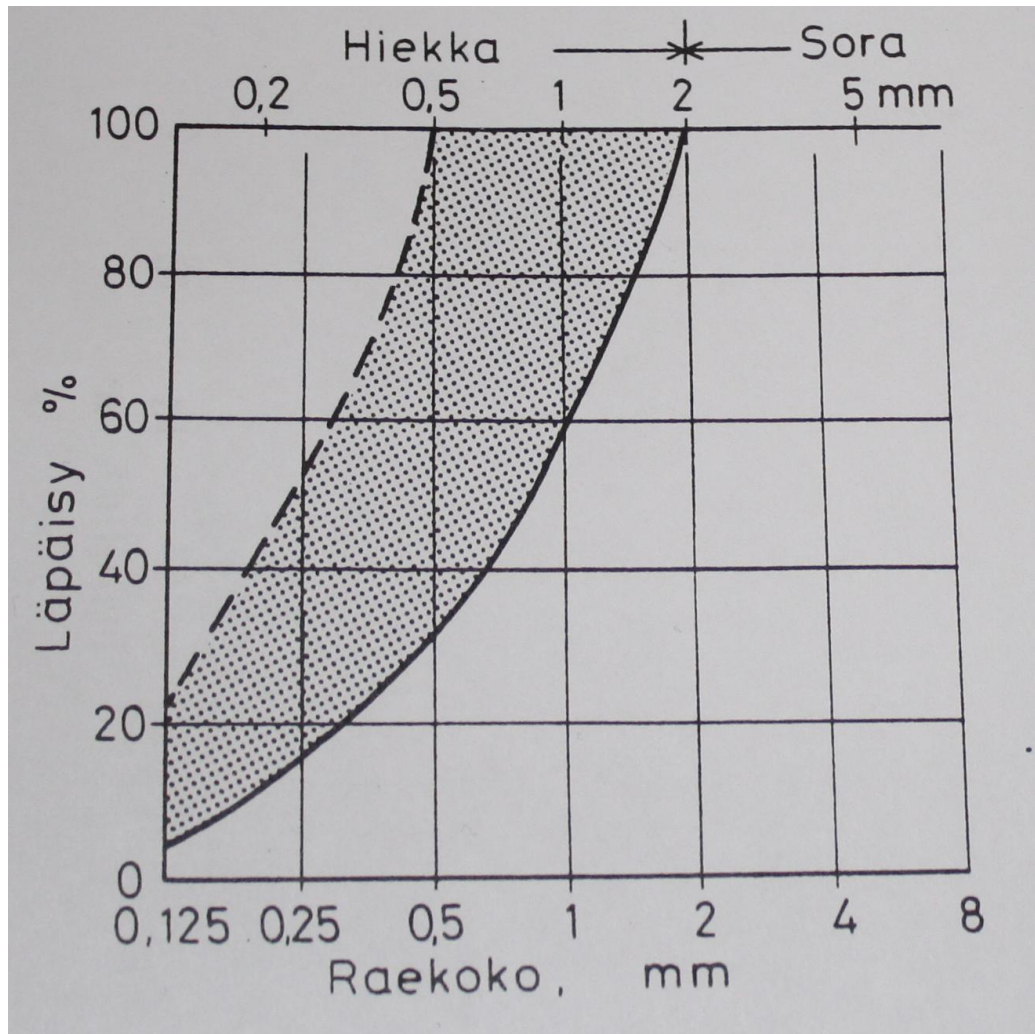
### **2.1 VTT:n tiedonanto 27, Kalliopulttien asennus ja laadunvalvonta**

VTT:n vuonna 1977 julkaisemaa tiedonanto 27:ää käytetään edelleenkin pohjana ja kriteerinä maanalaisessa kalliorakentamisessa suoritettavassa kalliorakenteen lujituspultituksessa. Lujituspulttien juotosmassaa tiedonanto ei käsittele kovinkaan tarkasti. Massalle on annettu ehdoiksi seuraavaa:

- Sementti oltava Portland-sementtiä
- Sementin ja hiekan painosuhteen on oltava noin 1:1
- Vesi-sementtisuhte saa olla enintään 0,6

Edellä mainituilla kriteereillä valmistettava massa ei sellaisenaan sovellu kovinkaan hyvin nykyisin käytössä olevalle pumppaus- ja sekoituskalustolle johtuen hiekan suuresta määrästä reseptissä. Hiekka aiheuttaa pumppausletkujen tukkeutumista, niin sanottuja hiekkatulppia.

Tiedonanto määrittelee myös juotoslaastissa käytettävälle kiviainekselle rakeisuuskäyrän (kuva 1.). /2/



Kuva 1. Juotoslaastin kiviaineksen rakeisuuskäyrän vaihtelualue /1/

Juotoslaastissa käytettävän kiviaineksen rakeisuuskäyrän tulee asettua kuvan 1 varjostetun alueen sisälle.

### **Pultin juottaminen.**

Pultit voidaan juottaa porausreikään useita eri menetelmiä käyttäen. Riippumatta käytettävästä menetelmästä juottaminen on tehtävä niin, että pultin ja reiän seinämän välinen tila kokonaan täyttyy juotosmassalla. Asennetut jännittämättömät pultit on suojattava koskettelulta juotosmassan kovettumisen aikana. Porausreikä täytetään laastilla pohjasta alkaen. Pulttitanko työnnetään laastilla täytettyyn reikään porausreiän suulle asennetun kumilaatan läpi tasaisesti ja

yhtäjaksoisesti käsin tai syöttölaitetta käyttäen. Lyömistä ja syöttölaitteella iskua on vältettävä. Pulttia ei saa liikutella edestakaisin. Pulttitangon työntämisen yhteydessä on juotoslaastia pursuttava ulos pultin reiästä. Mikäli näin ei tapahdu, on syy siihen selvitettävä ja reikä tarvittaessa injektoitava. Samoin jos pulttitankoa ei saada työnnettyksi koko pituudeltaan reikään, syy tähän on selvitettävä ja reikä on tarvittaessa porattava uudestaan. Pultin alas valumisen estämiseksi voidaan laastin kovettumisen ajaksi porausreiän suulle asettaa teräs- tai puukiihla. Kallioon kiinnitettävien rakenteiden ankkurointiin tarkoitettujen pulttien yhteydessä ei puukiiloja saa käyttää. /2/

### **Pultattavan reiän poraus**

Porausreikä tehdään suunnitelmien perusteella työn valvojan osoittamaan paikkaan ja suuntaan. Reikää porattaessa tarkkaillaan porauksen edistymistä ja poran käyttäytymistä. Sellaisista havaituista ilmiöistä, jotka saattavat vaikuttaa pultin asentamiseen tai pultin toimintaan, on ilmoitettava työn valvojalle. Porattu reikä on ennen pultin asentamista huuhdeltava vedellä. Alaspäin suunnatuista reiästä vesi on poistettava paineilmalla. Pulttia ei saa asentaa vettä vuotavaan reikään. Kallio on tarvittaessa injektoitava reiän ympäristöstä ennen pultin asentamista. /2/

### **Kallion ja pultin lämpötila**

Juotosmassan kovettumisreaktion alkamiseksi ja kunnollisen kovettumisen varmistamiseksi ei kallion eikä pultin lämpötila saa juottamisen jälkeen olla liian alhainen. Sementtilaastijuotosta käytettäessä ei kallion eikä pultin lämpötila saa laskea alle +5 °C:n pultin asentamista seuraavien kolmen vuorokauden aikana. Mikäli lujitettava rakenne joutuu alttiiksi jatkuville säänvaihteluille, on käytettävän massan oltava pakkasenkestävää. /2/

### **Pultitettavan kalliorakenteen ja räjäytettävän kohteen välinen etäisyys.**

Pulttien asennuskohdan ja räjäytyspaikan välinen matka tai näiden töiden välinen aikaero on oltava riittävän pitkä, jotta räjäytysten aiheuttama tärinä ei irrota



pulttitankoa juotosmassasta. Turvallinen välimatka ja aikaero riippuvat muun muassa kallion laadusta ja lämpötilasta, momentaanisen räjähdysaineen määrästä, juotosmassasta sekä kalliorakenteen muodosta ja mitoista. Turvallisinta olisi suorittaa räjäytykset vasta juotosmassan täysin kovettuttua. Jos pultittamista joudutaan suorittamaan lähellä räjäytyskohtaa, on tällaisten pulttien käyttö pysyvänä lujitusrakenteena selvitettävä erikseen. Sementtilaastijuotosta käytettäessä voidaan riittävänä etäisyytenä pitää 30 metrin matkaa tai 2 vuorokauden aikaeroa pultitus- ja räjäytystöiden välillä. /2/

## **Laadunvalvonta**

Laastin kiviaineksesta on suoritettava seulontakoe, lietekoe sekä humuskoe jokaisesta työmaalle toimitettavasta erästä betonin kiviaineksen laadun tarkkailusta annettujen ohjeitten mukaan, tai kiviaineksen laadusta on oltava sen toimittajan antama selvitys, jossa esitetään edellä mainittujen kokeiden tulokset.

Laastin notkeuden toteamiseksi ja tarkkailemiseksi suoritetaan vähintään kerran työvuorossa levenemäkoe. Levenemä määritetään kuivan lasilevyn päällä käyttäen kuparista tai messinkistä suoraa ympyrälieriötä, jonka sisähalkaisija on 40 mm ja korkeus 50 mm. Lieriö täytetään laastilla ja nostetaan tasaisesti ylös nostonopeuden ollessa 50 mm/s. Levenemäkuvion pienin ja suurin läpimitta mitataan. Kokeen tulkintaohjeet on esitetty Suomen betoniyhdistyksen julkaisussa 1, Injektointilaastin lisäaineiden käyttö (1972).

Tarvittaessa suoritetaan vedenerottumis- ja tilavuudenmuutoskokeita ja mitataan kovettuneen laastin puristuslujuus. / 2/

## **2.2 InfraRYL 2006**

InfraRYL 2006, eli infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, käsittelee kalliorakentamista osiossa Tekniset vaatimukset pääryhmä 1 maa- pohja- ja kalliorakenteet. Edellä mainitun osion kappaleessa 15200 Mekaanisesti lujitetut kalliorakenteet käsitellään kalliopultituksen työmenetelmiä sekä käytettävien materiaalien laatuvaatimuksia. InfraRYL 2006 ottaa kantaa ja määrittelee VTT:n tiedonanto 27:ään verrattuna hieman tarkemmin harjateräspulttien materiaalit, juotoslaastin lujuuden, valmiin pultituksen laatuvaatimukset, juotosmassan kel-

poisuuden toteamiseen käytettävät menetelmät, juotosmassan lujuuden räjäytettäessä pultattavan kohteen välittömässä läheisyydessä sekä tiedonannosta poikkeavat arvot pultitettavan ja räjäytettävän kohteen väliseksi etäisyydeksi. Kokonaan uutena asiana InfraRyl 2006 määrittelee juotoslaastin lujuus- ja rakenneluokaksi K35-2.

Tärkeimpänä seikkana InfraRYL 2006:n laatuvaatimuksista nousee esille kohdassa 15210.3 juotosmassalle esitetty lujuusvaatimus 30 MPa. Kohdassa kielletään räjäyttäminen 40 metriä lähempänä pultattavaa kohdetta ennen kuin juotosmassan lujuus on saavuttanut arvon 30 MPa. Kohdassa ei kuitenkaan millään tavalla oteta kantaa räjäytyksen aiheuttaman tärinän heilahdusnopeuteen, ominaistajuuteen eikä siirtymän määrään. Edellä mainituista tärinän ominaistajuuden sekä siirtymän arvoilla on erittäin suuri vaikutus tärinästä johtuvaan, sitoutumisvaiheessa olevalle juotosmassalle aiheutuvaan häiriöön.

### **Pultitusten tekemisen vaatimukset**

Kallion lujitustöitä tehdään ennen louhintatyön aloittamista, louhintatyön aikana (jolloin louhintatyö keskeytyy) ja louhintatöiden jälkeen sen mukaan kuin suunnitelma-asiakirjoissa on esitetty tai rakennuspaikalla työn aikana määrätään. Tarvittaessa rytmitetään louhinta- ja lujitustöitä siten, että kalliorakenteet ovat lujittamattomina mahdollisimman lyhyen ajan. Lujitettavan kalliomassan lämpötilaa tarkkaillaan mittaamalla kallion pintalämpötilaa ja lämpötilaa kallioon poratuista rei'istä. Lujitettavan kalliomassan lämpötila on normaalimenetelmiä käytettäessä vähintään +5 °C. Lujitettavilla pinnoilla tai rei'issä ei saa olla jäätä. Pulttien juotoslaastin tulee saavuttaa 30 MPa:n puristuslujuus, ennen kuin räjäyttäminen välittömässä läheisyydessä on sallittua. Ennen 30 MPa:n lujuuden saavuttamista räjäyttäminen on kielletty 40 m lähempänä pultituskohdetta, ellei suunnitelma-asiakirjoissa toisin määrätä. /3/

### **Teräspultituksen materiaalien vaatimukset**

Teräspultit ovat yleensä A500HW-pultteja, joiden nimellishalkaisija on 25 mm. Ne juotetaan kutistumattomalla sementtilaastilla tai hiekkasementtilaastilla kalli-

oon porattuihin reikiin. Jos juotettujen harjateräspulttien juotos ei täytä yllä mainittuja pultituksen tekemisen vaatimuksia, niitä käsitellään väliaikaisina lujituksina. Juotoslaastin lujuus- ja rakenneluokka on K35-2, ja sen valmistuksessa noudatetaan julkaisun by 50 rakenneluokkamääräyksiä. Laastin koostumus on sellainen, että se pysyy hyvin myös ylöspäin suuntautuvaan pystysuoraan reikään pumpattuna ja että laasti täyttää täydellisesti reiän ja reikään työnnetyn pultin välisen vapaan tilan. Laastissa käytetään betonin koossapysymistä parantavaa lisäainetta sekä notkistavaa lisäainetta. Vesimäärä valitaan mahdollisimman alhaiseksi. Laasti sekoitetaan koneellisesti. /3/

### **Teräspulttitusten tekeminen**

Pulteille porataan kallioon reiät, joiden suunnat ja pulttipituudet annetaan suunnitelma-asiakirjoissa tai määrätään paikalla. Pulttireiän halkaisija on vähintään 1,5 kertaa pultin halkaisija. Pulttireiän pituus on vähintään 50 mm suurempi kuin pultin pituus. Pulttien juotostyö aloitetaan huuhtelemalla reikä puhtaalla painevedellä. Reikä täytetään juotosmassalla alkaen reiän pohjasta. Täyttöletku vedetään reiästä tasaisesti ja yhtäjaksoisesti sen täyttymisen myötä siten, että reikään ei jää ilmapälejä. Oikeanmittainen pultti työnnetään reikään tasaisesti ja yhtäjaksoisesti käsin tai syöttölaitetta apuna käyttäen. Pultti on suora, eikä sitä taivuteta sisään työnnettynä. Pultin ulkonema kalliopinnasta on enintään 20 mm. Jos pulttireikä alkaa vuotaa ennen pultitusta, ei siihen saa juottaa pulttia, vaan toimitaan seuraavasti: pultin reikä injektoidaan, reikä puhdistetaan ja pultti juotetaan reikään. /3/

### **Juotosmassan kelpoisuus**

Juotosmassasta otetaan yksi koekappale jokaista 200 pulttia kohden. Koekappaleen puristuslujuus todetaan hyväksytyssä koestuslaitoksessa standardin SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus mukaisesti. Jos tulokset eivät täytä vaatimuksia, arvioi rakennuttaja ne pultitetut alueet, joissa lujuusvaatimus ei täyty. Nämä alueet pultitetaan uudelleen urakoitsijan kustannuksella. Koekappaleista laskettu vertailulujuus täyttää julkaisun by 50 2-luokan vaatimukset. /3/

## 2.3 RIL 253–2010 Rakentamisen aiheuttamat tärinät

Tänä vuonna julkaistu RIL 253–2010 käsittelee rakentamisen aiheuttamia tärinöitä. Julkaisussa on käsitelty laajasti erilaisten rakennustöiden aiheuttamia tärinöitä ja niistä aiheutuvia haittoja erilaisissa tilanteissa, myös lujituspulttien juottamisessa. Julkaisussa on annettu selkeästi lujuus sitoutumisvaiheessa olevalle juotosmassalle jonka saavutettuaan juotosmassa ei enää häiriinny räjäytyksistä johtuvista tärinäistä. Edellä mainittu lujuuden arvo on 5 MPa.

### Kovettuva betoni

Kovettuvan betonin herkkyys tärinälle on suurimmillaan sitoutumisessa ja kovettumisen alkuvaiheessa. Tärinän ohjearvo tulee asettaa rakenne, betonilaatu, valuolosuhteet ja tärinän luonne huomioon ottaen. Taulukossa 1. on esitetty periaate tärinän ohjearvon määrittämistä varten. /4/

Taulukko 1. Kovettuvaan betoniin kohdistuvan tärinän ohjearvo /4/

Betonirakenne	Kovettuvaan betoniin kohdistuvan tärinän ohjearvo		
	Ennen tärytysrajan alkua	Kovettumisvaiheen alkuosa	Kovettumisvaihe
Betonijuotetut kalliopultit	10 mm/s, kun pultti voi pudota, muuten ei rajoituksia	2...10mm/s puristuslujuuteen 5 MPa asti	Ei rajoituksia

Taulukossa 1 tärinän ohjearvona on käytetty heilahdusnopeuden arvoa. Taulukossa esitetty heilahdusnopeuden arvo 2...10 mm/s on todella pieni. Työmaalla tehtyjen tärinämittausten tuloksien perusteella voidaan viiden metrin pituinen perä räjäyttää 40 metrin etäisyydellä heti pulttien juottamisen jälkeen. Pultattaessa lähempänä räjäytettävää perää on juotosmassan annettava sitoutua ja kovettua, kunnes massa on saavuttanut lujuuden 5 MPa.

## **2.4 by 50 Betoninormit 2004**

Suomen Betoniyhdistys ry:n julkaisu by 50 Betoninormit 2004 esittää rajatilatar-  
kasteluihin perustuvan mitoitusmenetelmän kantavien betonirakenteiden suun-  
nittelua varten sekä menetelmän betonirakenteiden valmistamiseksi. Yhtenä  
kokonaisuutena toimivat rakenneosat mitoitetaan yhtä menetelmää käyttäen.  
Määräysten edellyttämä varmuustaso ja säilyvyys katsotaan saavutetuksi, kun  
rakenteet suunnitellaan ja valmistetaan sekä niiden kelpoisuus osoitetaan näi-  
den ohjeiden mukaisesti. Nämä ohjeet koskevat lujuusluokkiin K15...K100 kuu-  
luvien rakenteiden valmistusta ja lujuusluokkiin K15...K60 kuuluvien suunnitte-  
lua.

Betonirakenteet jaetaan kolmeen rakenneluokkaa, joita nimitetään 1-, 2- ja 3-  
luokiksi. Rakenteen saa lukea tiettyyn luokkaan kuuluvaksi, kun noudatetaan  
kyseiseen luokkaan liittyviä suunnittelu- ja työnsuoritusohjeita. Rakenteiden  
suunnittelijalla ja betonityönjohtajalla tulee olla käytettävän rakenneluokan mu-  
kainen pätevyys. /5/

## **3 TYÖMAALLA TEHDYT TUTKIMUKSET**

### **3.1 Tunnelissa vallitsevien olosuhteitten kartoitus**

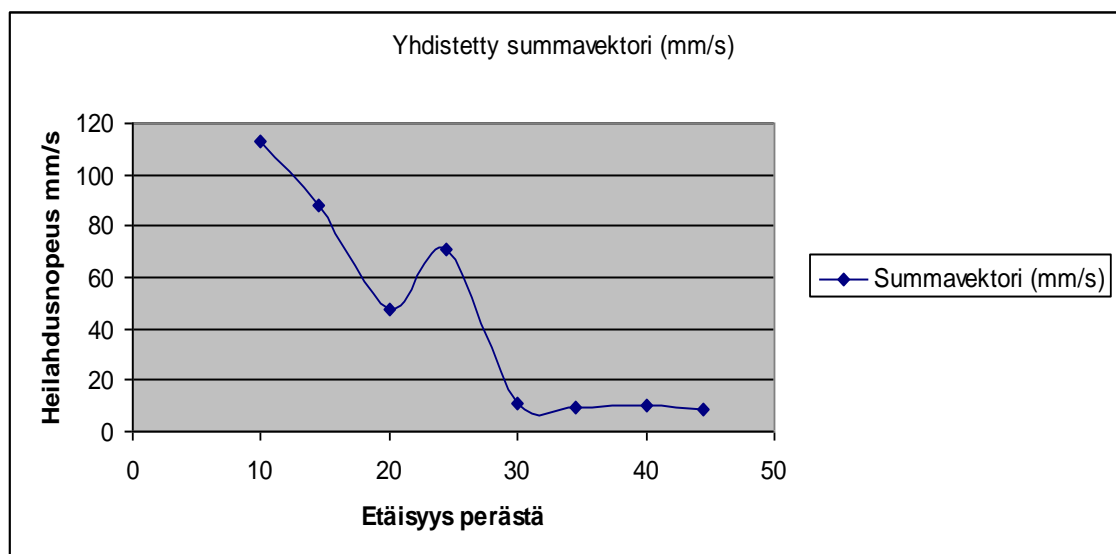
Tunnelissa vallitsevat olosuhteet kartoitettiin värinämittausten sekä lämpötilamit-  
tausten avulla. Olosuhteiden kartoitus oli tärkeää kokeen mahdollista toistamis-  
ta varten. Kartoituksen yhteydessä selvitettiin myös räjäytyksestä johtuvan hei-  
lahdusnopeuden huippuarvo erittäin läheltä räjäytettävää perää.

#### **3.1.1 Värinämittaukset**

Värinämittaukset tutkimuksessa suoritti Kalliotekniikka CE Oy. Kalliotekniikan  
edustajana värinämittauksessa toimi Juha Tuovinen. Käytetyt värinämittarit olivat  
Instantel Mini Mate Plus -merkkisiä laitteita. Käytetyissä antureissa heilahdus-  
nopeuden mittaustalue oli mittauspisteessä MP1 0-2540 mm/s ja lopuissa mitta-

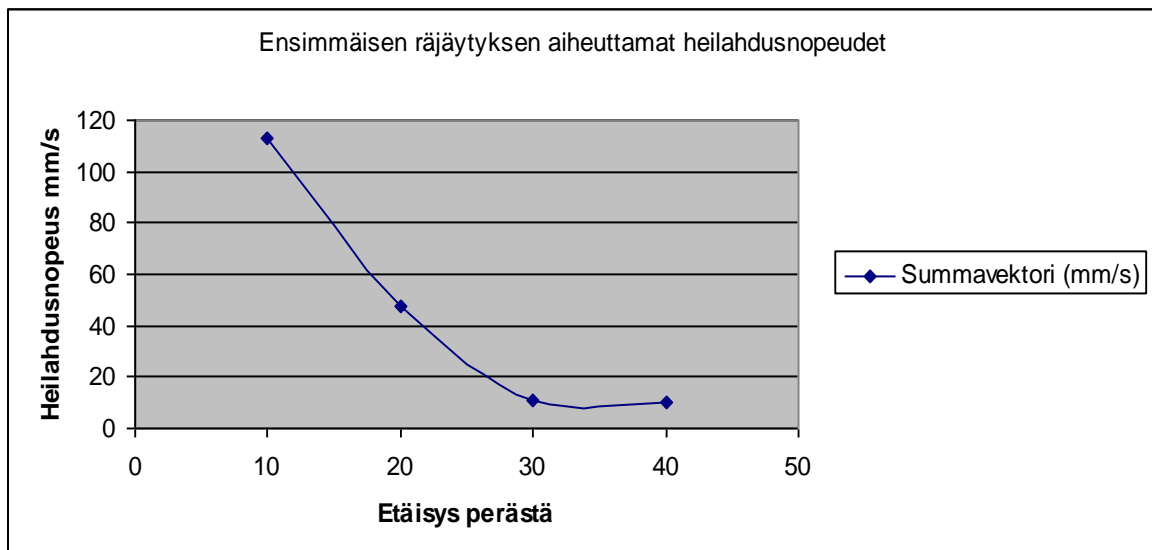
uspisteissä MP2, MP3 ja MP4 mittausalue oli 0-254 mm/s. Käytetty laitteisto mahdollisti räjäytyksestä johtuvien värinöiden mittaamisen kolmeen eri komponenttiin, sekä muissa paitsi anturissa MP1 tallennettiin heilahdusnopeuden lisäksi myös värähtelytaajuus, suurin kiihtyvyys sekä suurin siirtymä.

Antureitten mittausalue riitti hyvin suoritettuihin mittauksiin. Saadut tulokset olivat mittausarvoiltaan yllättävän pienet. Suurimmillaan heilahdusnopeus oli mitauspisteessä MP1 räjäytettäessä 10 metrin etäisyydellä anturista 5,0 metrin mittainen katko. Suurin heilahdusnopeuden summavektori oli tuolloin 112,97 mm/s. Kuvissa 2, 3 ja 4 selvennetään heilahdusnopeuden summavektorin arvoja eri etäisyyksillä mitattuna. Kuvissa 5 - 10 selvennetään antureiden asentamista sekä suojausta.

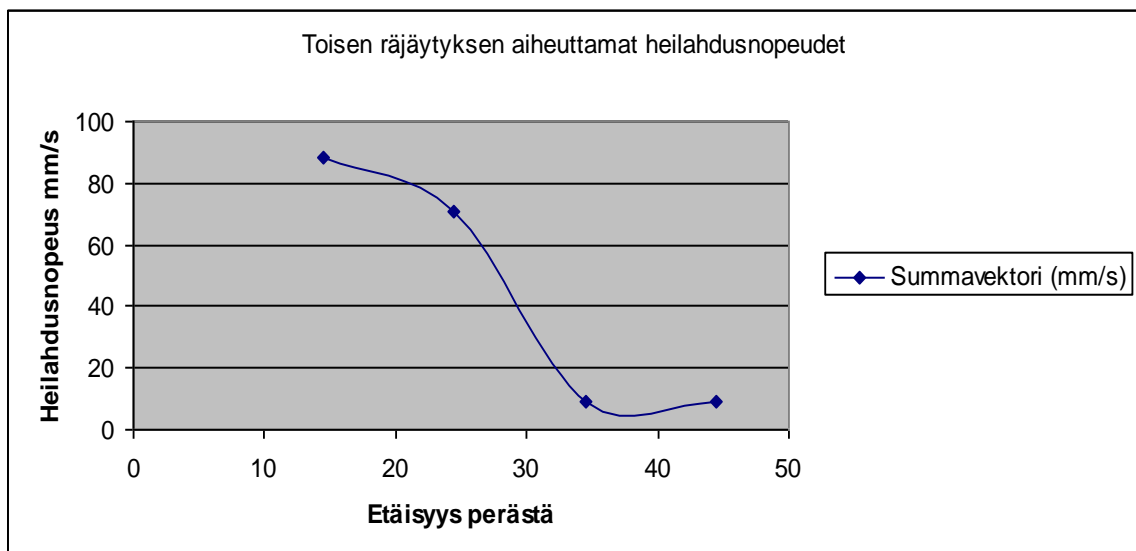


Kuva 2. Mitattujen heilahdusnopeuksien yhdistetty summavektori.

Kuvassa 2 on yhdistetty molempien mitattujen räjäytysten aiheuttamat heilahdusnopeudet eri mittauspisteillä etäisyyden funktiona.



Kuva 3. Ensimmäisen räjäytyksen aiheuttamat heilahdusnopeudet eri etäisyyksillä.



Kuva 4. Toisen räjäytyksen aiheuttamat heilahdusnopeudet eri etäisyyksillä.

Kuvat 3 ja 4 havainnollistavat räjäytysten aiheuttamien heilahdusnopeuksien eroja. Erot johtuivat todennäköisesti räjäytetyn kiven laadullisesta vaihtelusta. Räjäytyksissä käytetty poraus-, panostus- ja nallituskaavio sekä tästä johtuen myös momentaaninen panostusaste olivat samoja.



Kuva 5. Mittauspisteen MP1 anturi asennettuna kallioon.



Kuva 6. Anturi MP1 sekä anturin kaapeli asennettuna suojaputkeen.





Kuva 7. Mittauspisteen MP1 anturi suojattuna Larssen-pontin taakse.



Kuva 8. Mittauspisteen MP4 anturi asennettuna ja suojattuna Larssen-pontilla. Pontin vieressä koepultille porattu reikä maalilla merkittynä.



Kuva 9. Mittauspiste MP1 räjäytyksen jälkeen. Kaapelin suoja-putki suojattiin 0-32 - murskeella ennen räjäytystä.

Olosuhteet olivat erittäin haastavat antureille. Huono suojaus olisi väistämättä aiheuttanut antureiden rikkoontumisen ja mittauksen epäonnistumisen. Kuvasta 9 ilmenee mittauspisteen 1 välitön läheisyys räjäytettävään perään. Räjäytetyn louheen tilavuus verrattuna kiintokallioon on suurentunut siten että kivikasan reuna yltää 10 metrin päähän räjäytyspaalulta.

Tärinämittausraporteista ilmenee kuvissa 10 ja 11 heilahdusnopeuden huippuarvo sekä heilahdusnopeuden arvon muutokset räjäytyksen aikana graafisesti. Kuvissa 12 - 17 raportista ilmenee heilahdusnopeuden huippuarvo, heilahdusnopeuden arvon muutokset räjähdysten aikana graafisesti, tärinän taajuus, tärinän aiheuttama kiihtyvyys, tärinän aiheuttaman siirtymän suuruus sekä aika mitattuna räjäytys hetkestä jolloin tärinän huippuarvo sekä komponentti eli teoreettinen suunta, josta huippuarvo on mitattu.

Kuvissa 10 - 17 on esitetty tärinämittaustulokset mittauspisteittäin. Mittausraporteista on tehty yhteenvedot kuviin 3 ja 4 sivulla 15.

Date/Time Chan1 at 10:33:42 August 12, 2010  
 Record Time 9.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE13565 V 8.12-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Calibration March 31, 2008 by Instantel Inc.  
 File Name O565DD71.C60

**Notes**

Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kalliotekniikka CE Oy, p. 0207 437 400  
 General: MP1

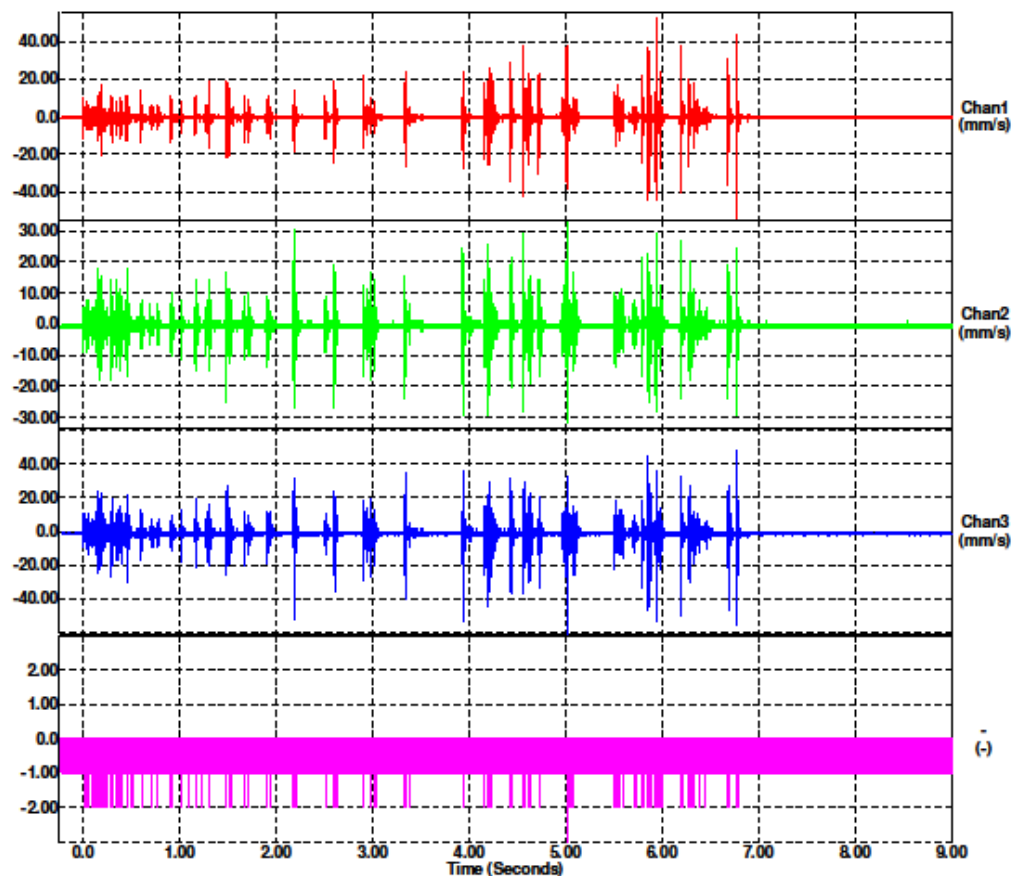
**Extended Notes**

Enkolsmittaus 3.8.2010 JT

**Post Event Notes**

Channel	Name	Peak	Time (sec)	Trigger Level	Gain	Range	Units
1	Chan1	54.6	6.771	10.00	1x	2540	mm/s
2	Chan2	33.0	5.021	10.00	1x	2540	mm/s
3	Chan3	61.0	5.022	10.00	1x	2540	mm/s
4	-	3.00	5.022	N/A	1x	2000	-

N/A: NotApplicable



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1995-2004 Instantel Inc.

Kuva 10. MP1, ensimmäinen räjäytys.

Date/Time Chan1 at 10:33:42 August 12, 2010  
 Record Time 9.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE13565 V 8.12-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Calibration March 31, 2008 by Instantel Inc.  
 File Name O565DD71.C60

## Notes

Location: Avlapolts  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kalliotekniikka CE Oy, p. 0207 437 400  
 General: MP1

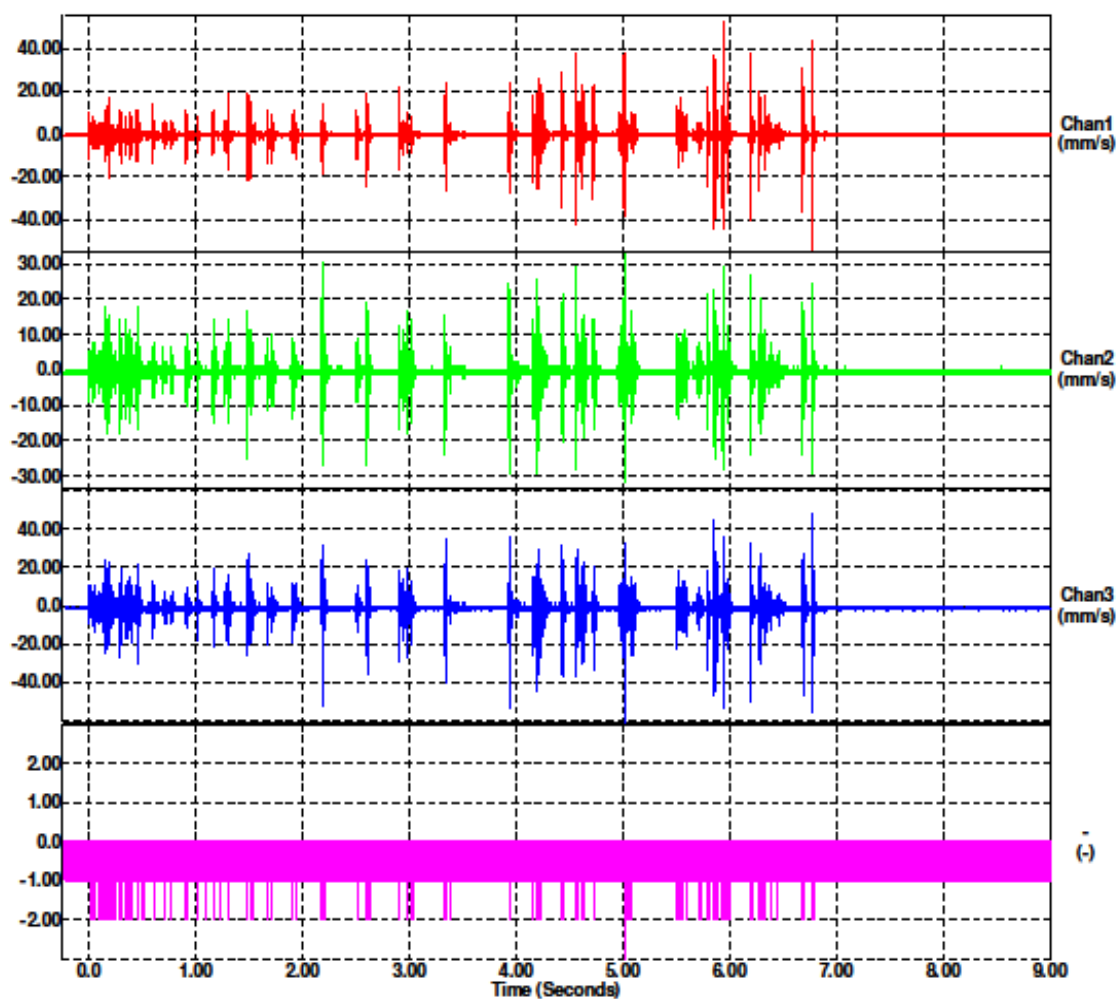
## Extended Notes

Erikolomittaus 3.8.2010 JT

## Post Event Notes

Channel	Name	Peak	Time	Trigger	Gain	Range	Units
			(sec)	Level			
1	Chan1	54.6	6.771	10.00	1x	2540	mm/s
2	Chan2	33.0	5.021	10.00	1x	2540	mm/s
3	Chan3	61.0	5.022	10.00	1x	2540	mm/s
4	-	3.00	5.022	N/A	1x	2000	-

N/A: Not Applicable



Kuva 11. MP1, toinen räjäytys.



Date/Time Long at 12:08:12 August 11, 2010  
 Trigger Source Geo: 10.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 15.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE9630 V 8.01-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Calibration July 14, 2004 by Instantel Inc.  
 File Name K630DD58.100

**Notes**

Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kalliotekniikka CE Oy, p. 0207 437 400  
 General: MP2

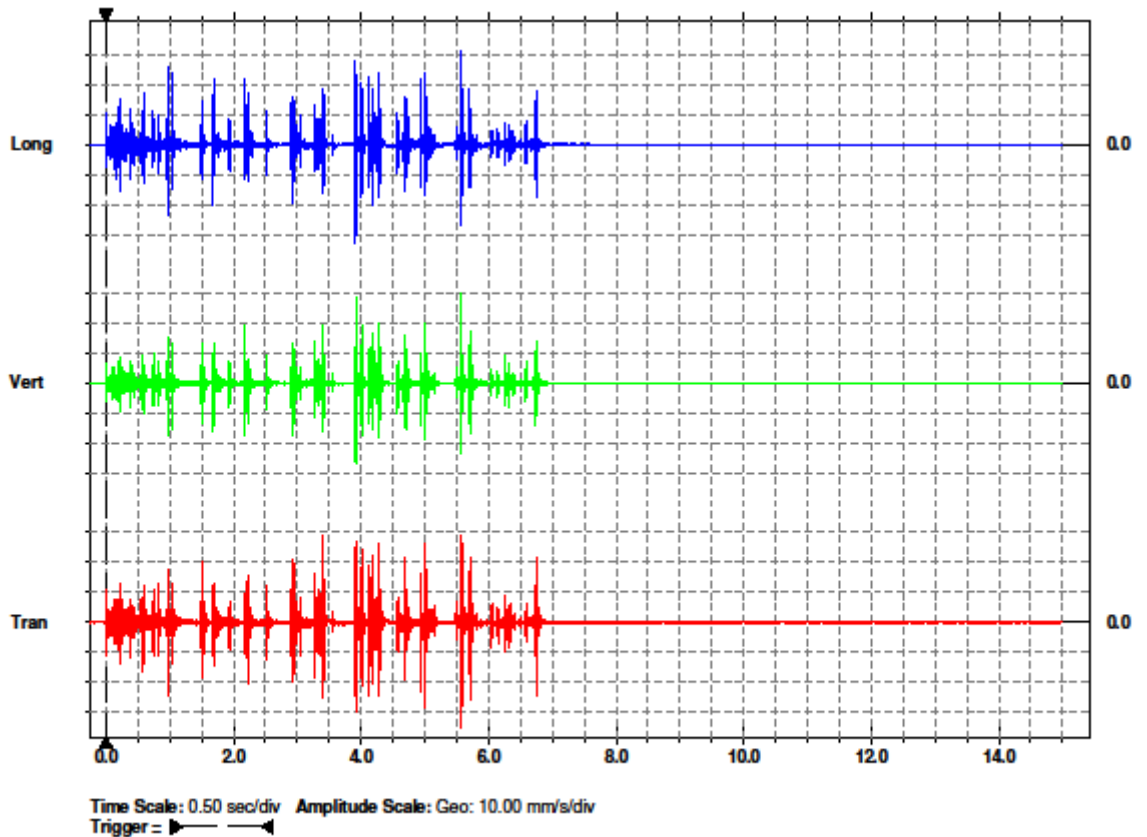
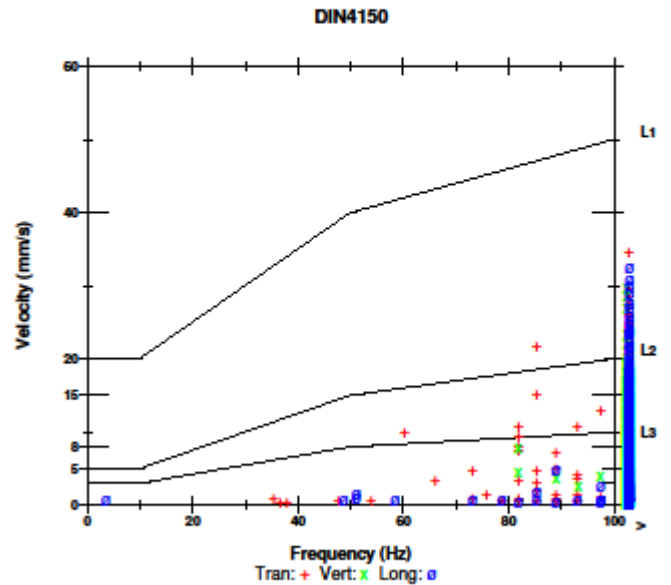
**Extended Notes**

Enkoismittaus 3.8.2010 JT

**Post Event Notes**

	Tran	Vert	Long	
PPV	34.8	29.8	32.5	mm/s
PPV (Ponderated)	4.31	3.73	2.93	mm/s
ZC Freq	293	228	256	Hz
Time (RefL to Trig)	5.566	5.575	3.914	sec
Peak Acceleration	6.15	4.24	5.78	g
Peak Displacement	0.0302	0.0242	0.0369	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 47.7 mm/s at 3.917 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1996-2004 Instantel Inc.

Kuva 12. MP2, ensimmäinen räjäytys.

## Event Report

Date/Time Tran at 10:33:43 August 12, 2010  
 Trigger Source Geo: 5.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 9.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE9630 V 8.01-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.4 Volts  
 Calibration July 14, 2004 by Instantel Inc.  
 File Name K630DD71.C70

### Notes

Location: Aviaapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kalliotekniikka CE Oy, p. 0207 437 400  
 General: MP2

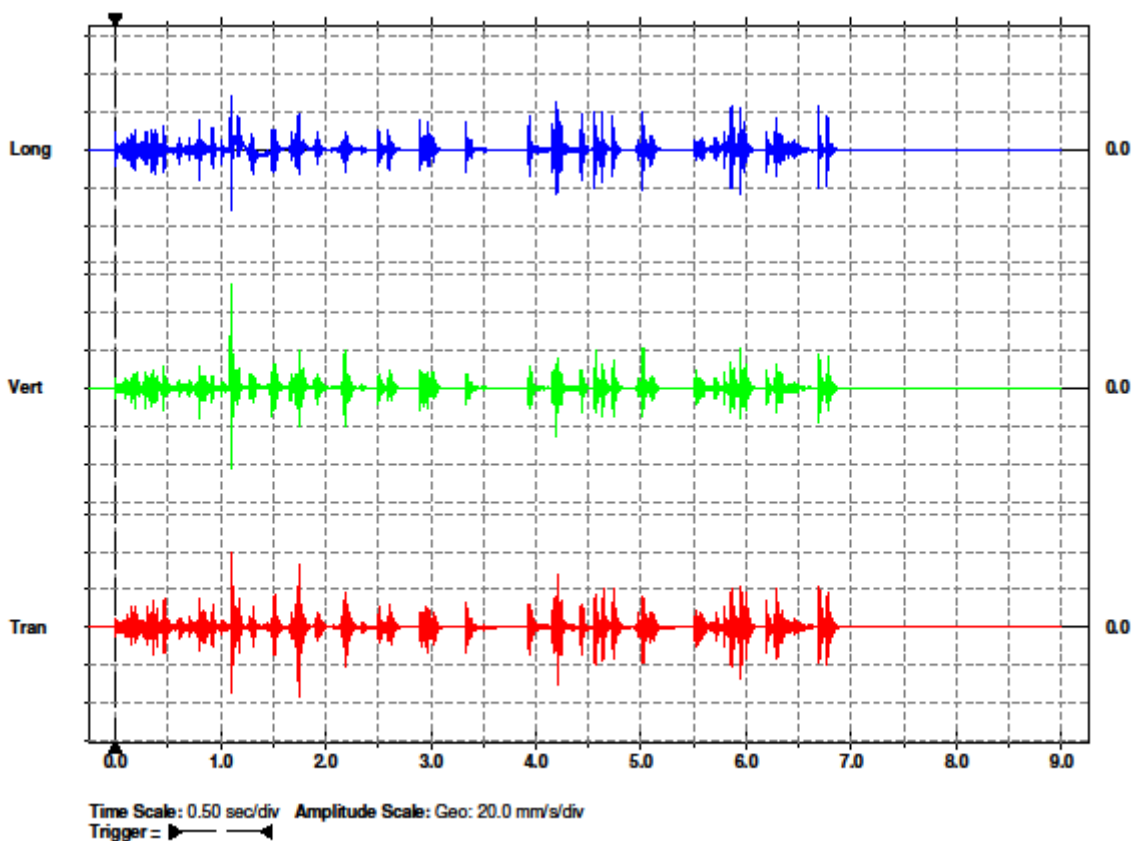
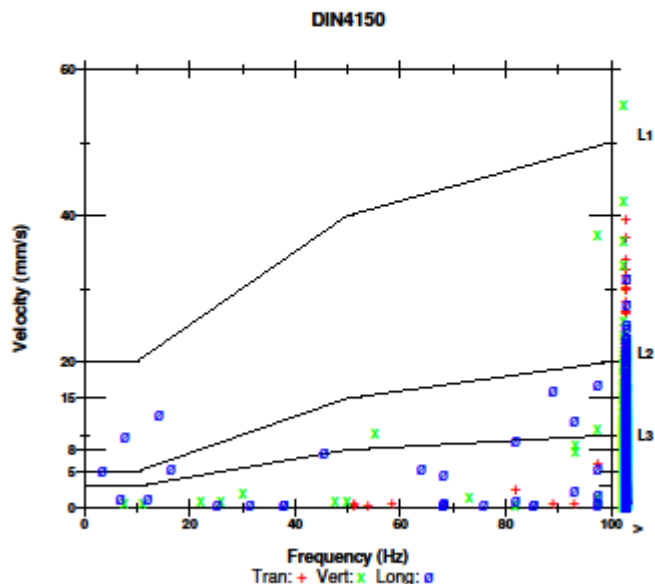
### Extended Notes

Erkoismittaus 3.8.2010 JT

### Post Event Notes

	Tran	Vert	Long	
PPV	39.6	55.2	31.5	mm/s
PPV (Ponderated)	2.46	10.9	16.1	mm/s
ZC Freq	228	256	256	Hz
Time (ReL to Trig)	1.101	1.101	1.099	sec
Peak Acceleration	6.20	7.95	5.25	g
Peak Displacement	0.0271	0.0437	0.181	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 71.1 mm/s at 1.101 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1996-2004 Instantel Inc.

Kuva 13. MP2, toinen räjäytys.

Date/Time Tran at 12:08:13 August 11, 2010  
 Trigger Source Geo: 7.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 15.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE9378 V 8.01-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.2 Volts  
 Calibration April 23, 2004 by Instantel Inc.  
 File Name K378DD5B.1P0

## Notes

Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kalliotekniikka CE Oy  
 General: MP3

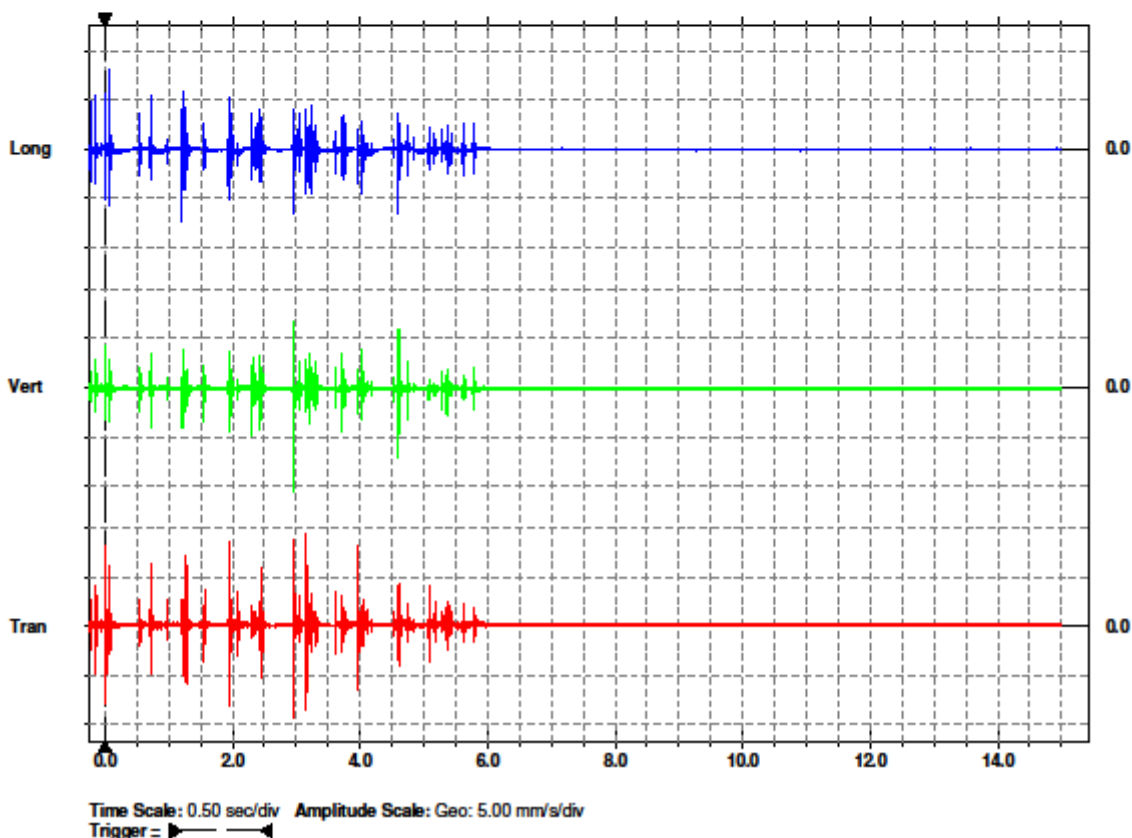
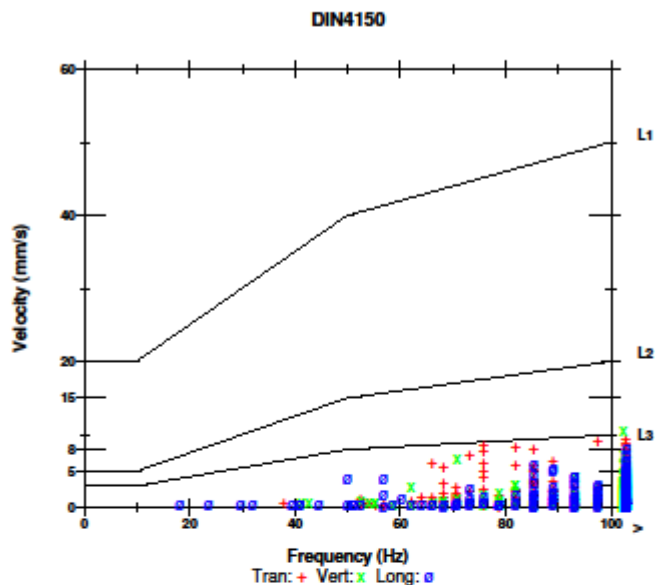
## Extended Notes

Erkoismitaus 3.8.2010 JT

## Post Event Notes

	Tran	Vert	Long	
PPV	9.40	10.7	8.13	mm/s
PPV (Ponderated)	2.51	2.32	1.96	mm/s
ZC Freq	114	114	137	Hz
Time (ReL to Trig)	3.157	2.952	0.074	sec
Peak Acceleration	0.901	0.954	0.742	g
Peak Displacement	0.0166	0.0144	0.0101	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 11.2 mm/s at 2.952 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1996-2004 Instantel Inc.

Kuva 14. MP3, ensimmäinen räjäytys.

Date/Time Long at 10:33:44 August 12, 2010  
 Trigger Source Geo: 5.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 9.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE9378 V 8.01-8.0 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Calibration April 23, 2004 by Instantel Inc.  
 File Name K378DD71.C80

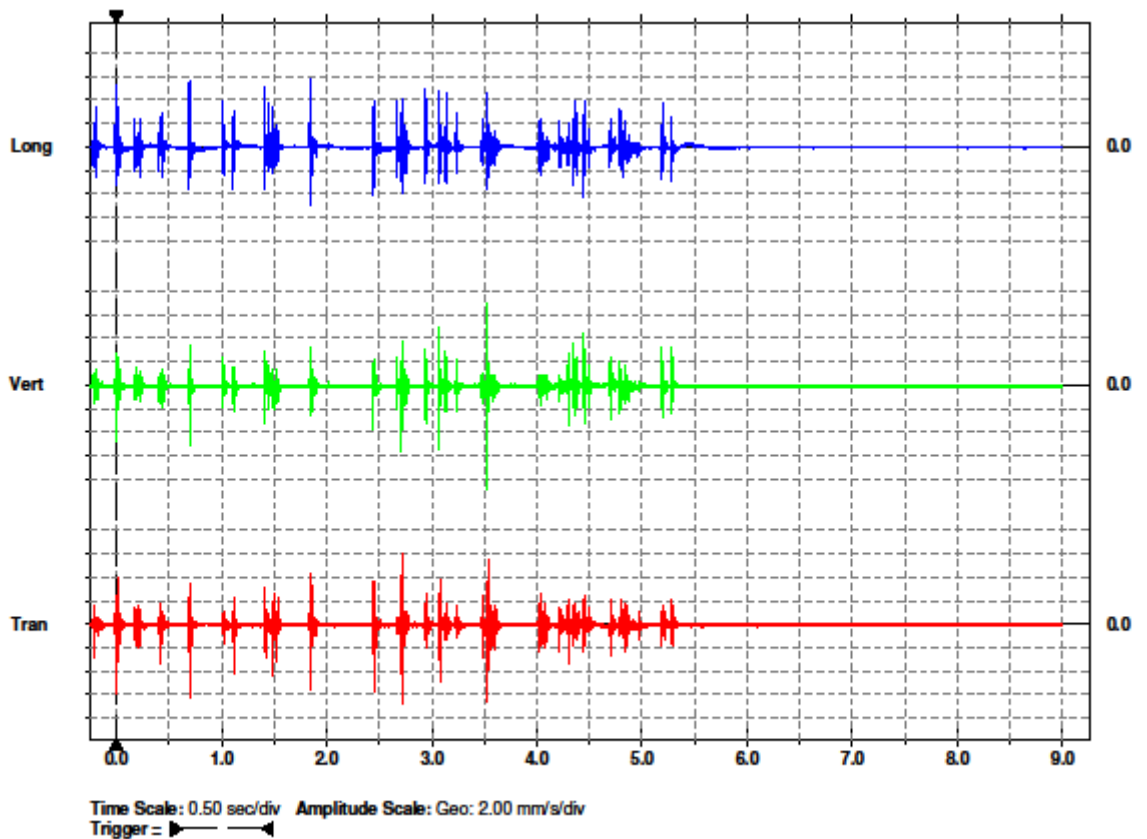
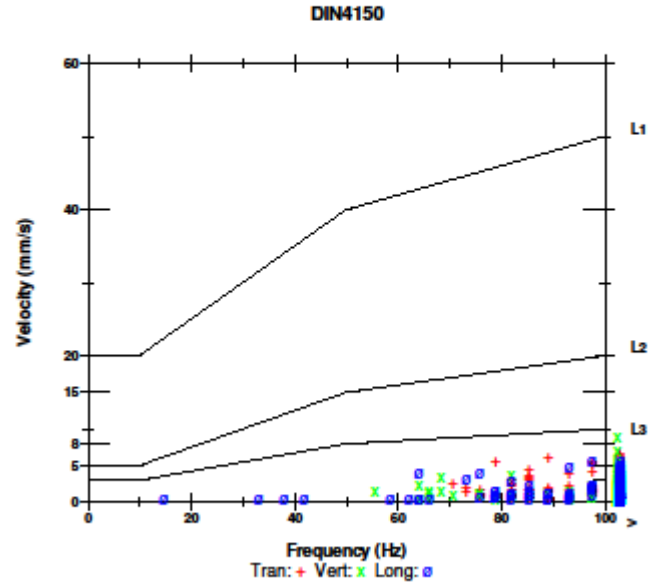
**Notes**  
 Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kallioleknikka CE Oy  
 General: MP3

**Extended Notes**  
 Erkoismittaus 3.8.2010 JT

## Post Event Notes

	Tran	Vert	Long	
PPV	6.73	8.89	5.71	mm/s
PPV (Ponderated)	1.28	1.48	1.22	mm/s
ZC Freq	102	120	137	Hz
Time (Ref. to Trig)	2.727	3.526	1.846	sec
Peak Acceleration	0.530	0.742	0.530	g
Peak Displacement	0.00941	0.0115	0.00774	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 9.93 mm/s at 3.526 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1995-2004 Instantel Inc.

Kuva 15. MP3, toinen räjäytys.



Date/Time Long at 12:08:13 August 11, 2010  
 Trigger Source Geo: 5.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 15.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE15795 V 10.06-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Calibration May 5, 2010 by Instantel inc.  
 File Name Q795DD5B.1P0

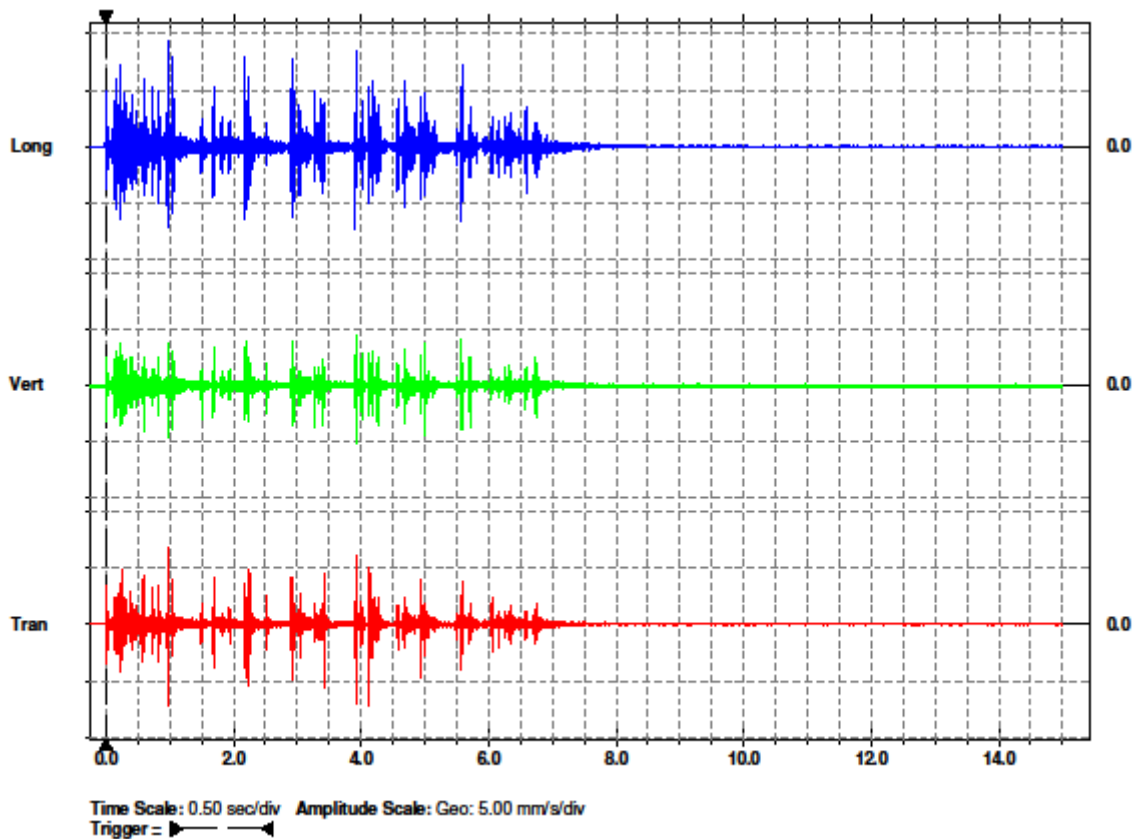
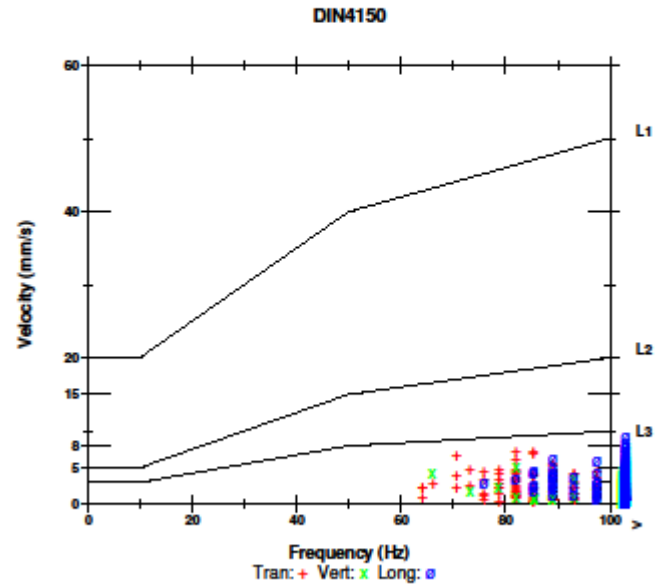
**Notes**  
 Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kallioleknikka CE Oy  
 General: MP4

**Extended Notes**  
 erikolmittaus 3.8.2010 JT

**Post Event Notes**

	Tran	Vert	Long	
PPV	7.24	5.08	9.27	mm/s
PPV (Ponderated)	2.07	1.42	1.72	mm/s
ZC Freq	82	82	171	Hz
Time (Ref. to Trig)	0.973	3.918	0.972	sec
Peak Acceleration	0.742	0.795	1.06	g
Peak Displacement	0.0137	0.00833	0.0101	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 10.2 mm/s at 0.972 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1995-2004 Instantel Inc.

Kuva 16. MP4, ensimmäinen räjäytys.

Date/Time Long at 10:33:43 August 12, 2010  
 Trigger Source Geo: 4.00 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 9.0 sec at 4096 sps  
 Job Number: 6351

Serial Number BE15795 V 10.06-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.4 Volts  
 Calibration May 5, 2010 by Instantel inc.  
 File Name Q795DD71.C70

## Notes

Location: Avlapolis  
 Client: YIT Rakennus Oy  
 User Name: Kallioleknikka CE Oy  
 General: MP4

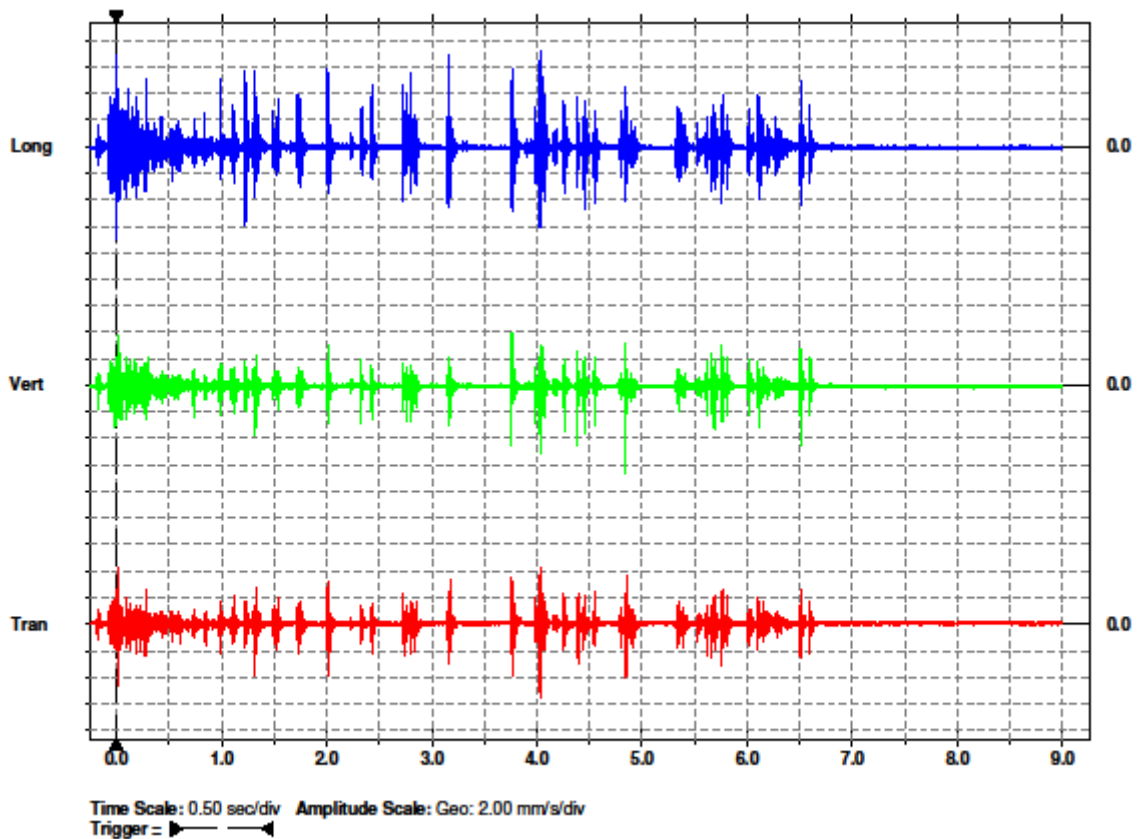
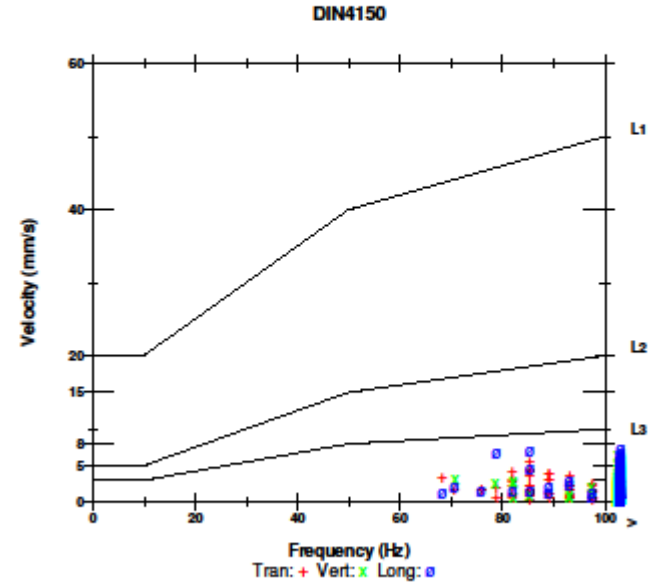
## Extended Notes

erikolmittaus 3.8.2010 JT

## Post Event Notes

	Tran	Vert	Long	
PPV	5.59	6.60	7.24	mm/s
PPV (Ponderated)	1.18	1.46	1.88	mm/s
ZC Freq	85	108	228	Hz
Time (Ref. to Trig)	4.042	4.842	4.033	sec
Peak Acceleration	0.689	0.689	1.01	g
Peak Displacement	0.00913	0.00665	0.00908	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 8.87 mm/s at 4.034 sec



Printed: August 16, 2010 (V 8.01 - 8.01)

Format Copyrighted 1995-2004 Instantel Inc.

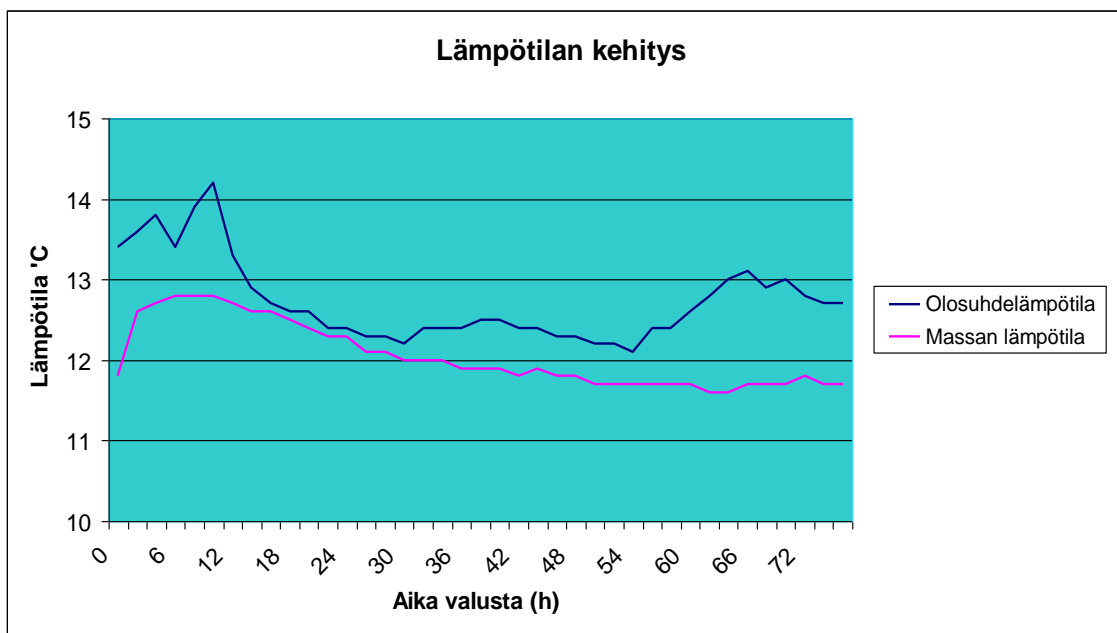
Kuva 17. MP4, toinen räjäytys.

### 3.1.2 Kalliomassan lämpötila

Kalliomassan lämpötilaa seurattiin digitaalisella nelikanavaisella TESTO 177,T4-merkkisellä lämpötilaloggerilla (kuva 19, s.29). Lämpötilaloggeri tallensi mitatun arvon kahden tunnin välein alkaen juottamishetkestä (taulukko 2, s28).

### 3.1.3 Juotosmassan lämpötila

Juotosmassan lämpötilaa seurattiin samalla loggerilla kuin kalliomassan lämpötilaakin. Juotosmassa tuotti laboratorio-olosuhteissa 19 °C olosuhdelämpötilassa 150 mm X 150 mm X 150 mm koekuutioihin valettaessa huomattavan paljon lämpöä. Kun tunnelissa juotettiin Ø 54mm reikään Ø 25mm sinkitty A500HW – harjateräspultti, jäi reiän seinämän ja harjateräksen väliin liian pieni tilavuus, jotta massa olisi sitoutuessaan jaksanut tuottaa riittävästi lämpöä nopeuttaakseen sitoutumista. Mittausdata osoittaa kalliomassan lämpötilan olleen tutkimuksen ajankohtana 11,7 °C, tunnelissa vallitsevan olosuhdelämpötilan keskimäärin 12,8 °C ja juotosmassan korkeimman lämpötilan 12,8 °C. Kuvassa 18 esitetty lämpötilan kehitys graafisesti.



Kuva 18. Lämpötilaseurannan tulokset.

Taulukko 2. Lämpötilamittauksen tulokset kahden tunnin välein.

YIT Infra Oy	Aika h valusta	Date	Time	[°C] olosuhde	[°C] ankkuri 1
	1	0 6.8.2010	0:52:14	13,4	11,8
	2	2 6.8.2010	2:52:14	13,6	12,6
	3	4 6.8.2010	4:52:14	13,8	12,7
	4	6 6.8.2010	6:52:14	13,4	12,8
	5	8 6.8.2010	8:52:14	13,9	12,8
	6	10 6.8.2010	10:52:14	14,2	12,8
	7	12 6.8.2010	12:52:14	13,3	12,7
	8	14 6.8.2010	14:52:14	12,9	12,6
	9	16 6.8.2010	16:52:14	12,7	12,6
	10	18 6.8.2010	18:52:14	12,6	12,5
	11	20 6.8.2010	20:52:14	12,6	12,4
	12	22 6.8.2010	22:52:14	12,4	12,3
	13	24 7.8.2010	0:52:14	12,4	12,3
	14	26 7.8.2010	2:52:14	12,3	12,1
	15	28 7.8.2010	4:52:14	12,3	12,1
	16	30 7.8.2010	6:52:14	12,2	12
	17	32 7.8.2010	8:52:14	12,4	12
	18	34 7.8.2010	10:52:14	12,4	12
	19	36 7.8.2010	12:52:14	12,4	11,9
	20	38 7.8.2010	14:52:14	12,5	11,9
	21	40 7.8.2010	16:52:14	12,5	11,9
	22	42 7.8.2010	18:52:14	12,4	11,8
	23	44 7.8.2010	20:52:14	12,4	11,9
	24	46 7.8.2010	22:52:14	12,3	11,8
	25	48 8.8.2010	0:52:14	12,3	11,8
	26	50 8.8.2010	2:52:14	12,2	11,7
	27	52 8.8.2010	4:52:14	12,2	11,7
	28	54 8.8.2010	6:52:14	12,1	11,7
	29	56 8.8.2010	8:52:14	12,4	11,7
	30	58 8.8.2010	10:52:14	12,4	11,7
	31	60 8.8.2010	12:52:14	12,6	11,7
	32	62 8.8.2010	14:52:14	12,8	11,6
	33	64 8.8.2010	16:52:14	13	11,6
	34	66 8.8.2010	18:52:14	13,1	11,7
	35	68 8.8.2010	20:52:14	12,9	11,7
	36	70 8.8.2010	22:52:14	13	11,7
	37	72 9.8.2010	0:52:14	12,8	11,8
	38	74 9.8.2010	2:52:14	12,7	11,7
	39	76 9.8.2010	4:52:14	12,7	11,7
	40	78 9.8.2010	6:52:14	14	11,7
	41	80 9.8.2010	8:52:14	15,7	11,8



Kuva 19. Lämpötilaloggeri



Kuva 20. Lämpötilaloggerin anturikaapeli sekä koepultti juotettuna mittauspisteellä MP4.

### 3.2 Koepulttien juottaminen

Työmaalla suoritettiin värinämittausten yhteydessä myös testisarjan pulttien juottaminen. Pultit juotettiin värinämittareiden välittömään läheisyyteen, enintään metrin etäisyydelle antureista. Juotetut pultit olivat Ø 25 mm A500HW sinkittyjä pituudeltaan 3 metrin harjateräksiä. Pultit juotettiin 8 tuntia ennen räjäytystä kallioon ensimmäisten laboratoriokokeiden perusteella valitulla reseptillä valmistetulla juotosmassalla. Reiät johon pultit juotettiin, oli porattu halkaisijaltaan 54 mm porakruunulla, reikien todellisen halkaisijan ollessa noin 56 mm. Valittu resepti sisälsi sementtiä sekä hiekkaa saman painosuhteessa 1:1, vettä 0,6 sementin painoyksikköä sekä lisäainetta 4 % sementin painosta. Sementtinä käytettiin Finnsementin Pikasementtiä, hiekkana 0,5 mm - 2,5 mm hiekkaa ja lisäaineena SPRUT NA-43 -kiihdytintä. Käytetyn reseptin osa-aineiden painosuhteet olivat VTT:n tiedonanto 27:n mukaiset, mutta työmaalla ilmeni vakava ongelma käytettäessä kyseisiä painosuhteita. Massa oli koostumukseltaan liian vetelää sekä liian hiekkaista. Juotettaessa ylöspäin suuntautuviin reikiin ei massaa mitään suurimmalla todennäköisyydellä tulisi pysymään reiässä. Hiekan liian suuri suhde sementtiin aiheutti tukkeutumisia pumpun ja varsinaisen juotosletkun välissä sijaitsevan letkun liittimissä. Liittiminä oli 1,5” Camlock-tyyppiset pikaliittimet ja letkuna 2-teräskudoksinen hydraulikkaletku. Hiekka tulppasi koemassalla juotettaessa liittimien karoihin, mikä aiheutti hetkellisen keskeytyksen juotostyöhön. Pulttien juottamisen jälkeen juotosmassa sai sitoutua noin kahdeksan tuntia ennen perän räjäytystä. Laboratoriokokeiden perusteella massa olisi saavuttanut edellä mainitussa ajassa lujuuden 8 MN/m<sup>2</sup>, joka RIL 253–2010 -julkaisun mukaan sallii räjäytykset juotettujen pulttien läheisyydessä ilman värinärajaa.





Kuva 21. Juotettu koepultti mittauspisteellä MP2.

### 3.3 Koepulttien vetokokeet

Testisarjan pulteille suoritettiin 28 vuorokauden kuluttua juottamisesta vetokokeet. Vetolaitteena käytettiin ENERPAC TURBO II -tyyppistä tunkkia. Tunkin vetokyky oli 120 kN hydraulipiirin paineen ollessa 680 bar. Koepulttien päihin hitsattiin muunnoskappale, joka liitettiin kierteillä itse tunkin sylinteriin. Pultteja tunkattaessa ei tapahtunut havaittavia reaktioita tunkattavissa pulteissa. Juote-  
tuista pulteista päästiin koevetämään ainoastaan paaluilla räjäytetty perä +10 metriä sekä räjäytetty perä +40 metriä sijainneet pultit johtuen kahden muun pultin vahingoittumisesta tunnelin normaalin louhinnan aikana.



Kuva 22. Koevetolaitteen tunkki asennettuna testipultin päähän mittauspisteellä MP4.



Kuva 23. Koevetolaitteen pumppuosa, jossa kiinteä painemittari.



### 3.4 Työmaalla käytettävissä oleva kalusto

Työmaalla käytettävä kalusto vaihtelee suuresti työtä suorittavan toimijan mukaan. YIT Rakennus Oy:n työmaalla lujituspulttien juottamiseen käytettiin tasosekoittajana sekä massapumppuna Putzmeisterin monitoimilaitetta (kuva 24). Tämän tyyppinen laite on yleisesti käytössä suuremmilla kalliorakennusyrityksillä. Letkuna toimi kaksikudoksinen 1” hydraulikkaletku ja liittiminä 1” Camlock-liittimet. Pultinreikään työnnettävä varsinainen juotosletku oli Ø 25 mm muoviletku. Tasosekoittajapumppu oli asennettu kuorma-auton lavalle laitteen siirtelyn helpottamiseksi. Samalla lavalla tasosekoittajapumpun kanssa on yleisesti myös sementti- ja hiekkasäkit. Juotosmassaan tarvittava vesi otetaan tunneleissa porajumbon huuhteluvettä varten asennetuista painevesilinjoista. Pultausalustalla ei ole mahdollista käyttää tarkkoja vaakoja kuten laboratorioolosuhteissa, joten juotosmassan reseptin määrien tulisi olla helposti mitattavissa yksiköissä kuten säkkeinä, ämpäreinä tai pullollisina.



Kuva 24. Putzmeister-monitoimilaitte, jossa tasosekoittaja sekä massapumppu

## 4 LABORATORIOTUTKIMUKSET

### 4.1 Koekappaleet

Koekappaleet valettiin 150 mm X 150 mm X 150 mm - kokoisiin muovisiin ELE Interanationalin toimittamiin koekappalemuotteihin, joita tärytettiin tärypöydällä noin viiden sekunnin ajan välittömästi valamisen jälkeen. Täryttämisen jälkeen koekappaleet siirrettiin laboratorion lattian tasalle tasaisen lämpötilan takaamiseksi.

### 4.2 Laboratoriossa käytetyt laitteet

Laboratoriossa massan valmistamiseen käytettiin MAMMUT TM 95 S 4 KW - tasosekoitinta ja koekappaleiden puristuslujuuden testaamiseen ADR Auto 2000 - tunkkia. Koekuutioiden tärytykseen käytetyn tärypöydän epäkeskomootorin teho oli 0,5 kW.



Kuva 25. Laboratoriossa käytetty tasosekoittaja.

### 4.3 Betonimassan runkoaines

Betonimassan runkoaineeksi käytettiin seulottua, rakeisuudeltaan 0,5 mm - 2,5 mm hiekkaa.

### 4.4 Betonimassat eri resepteillä

Ensimmäisessä laboratoriosarjassa pyrittiin kokeilemaan mahdollisimman kattavasti yleisesti käytössä olevia eri lisäaineita sekä niiden soveltumista juotomassan lisäaineeksi. Eri sementtilaatuja oli kolme: Plussementti, Rapidsementti sekä Pikasementti. Kaikki sementit ovat Finnsementti Oy:n standardin SFS-EN 197-1 mukaisia tuotteita. Standardin mukaan sementti on hydraulinen sideaine, jolla tarkoitetaan hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa pastan, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatio-reaktioiden kautta ja joka kovettumisen jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla /6/. Testattuja lisäaineita oli myös kolme: Silika, SHOTMIX ja Sprut NA-43. Silika ja SHOTMIX ovat Finnsementti Oy:n tuotteita ja Sprut NA-43 Rescon Mapein tuote. Taulukossa 3 on esitetty ensimmäisten laboratoriokokeiden koemassojen reseptien koostumus.

Taulukko 3. Ensimmäisten laboratoriokokeiden reseptit.

Resepti 1			kg
Sementtilaatu	Plus		15
Kiviaines			15
Lisäaine	Silika		0,45
Vesi			9
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana	23

Resepti 2			kg
Sementtilaatu	Plus		15
Kiviaines			15
Lisäaine	SHOTMIX		0,75
Vesi			9
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana	28

Resepti 3				kg	
Sementtilaatu		Plus		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		SPRUT NA 43		0,6	
Vesi				9	
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana			23

Resepti 4				kg	
Sementtilaatu		Rapid		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		Silika		0,45	
Vesi				9	
W/C =		Massan lämpötila valun aikana			24

Resepti 5				kg	
Sementtilaatu		Rapid		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		SHOTMIX		0,75	
Vesi				9	
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana			29

Resepti 6				kg	
Sementtilaatu		Rapid		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		SPRUT NA 43		0,6	
Vesi				9	
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana			25

Resepti 7				kg	
Sementtilaatu		Pika		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		Ei lisäainetta			
Vesi				9	
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana			23

Resepti 8				kg	
Sementtilaatu		Pika		15	
Kiviaines				15	
Lisäaine		Silika		0,45	
Vesi				9	
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana			25

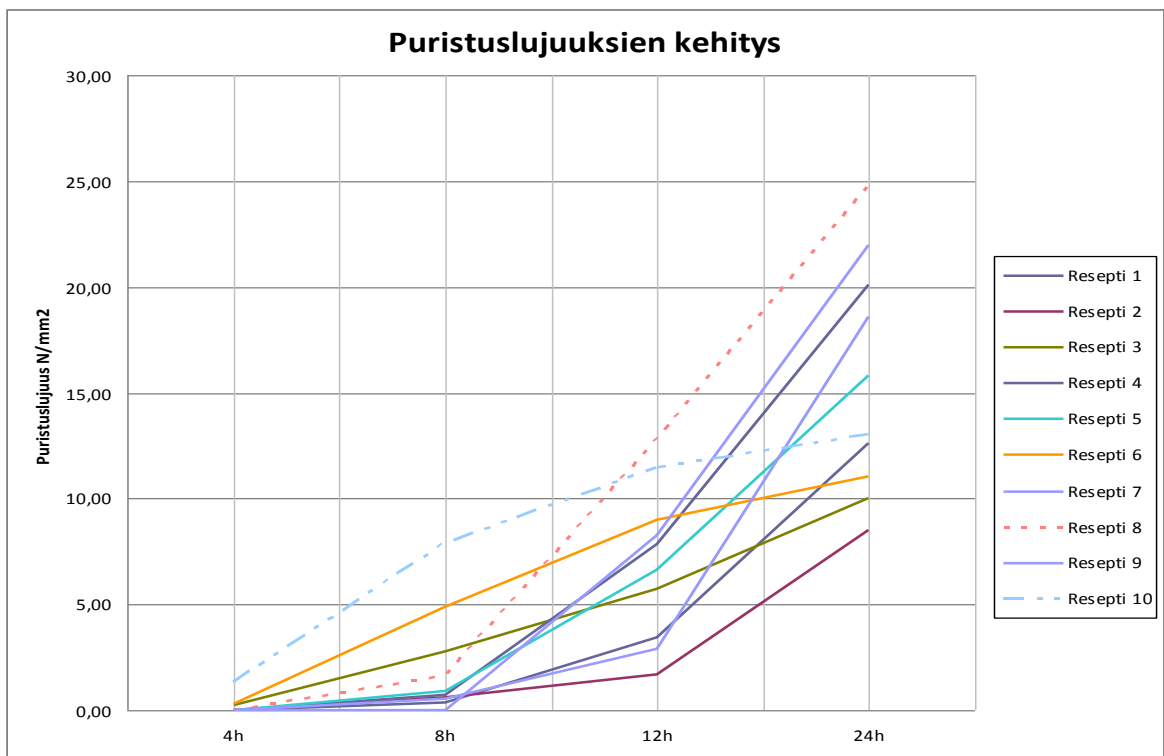
Resepti 9			kg
Sementtilaatu	Pika		15
Kiviaines			15
Lisäaine	SHOTMIX		0,75
Vesi			9
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana	28

Resepti 10			kg
Sementtilaatu	Pika		15
Kiviaines			15
Lisäaine	SPRUT NA 43		0,6
Vesi			9
W/C =	0,6	Massan lämpötila valun aikana	27

Taulukossa 4 ja kuvassa 26 on esitetty ensimmäisen laboratorikokeiden koe-massojen puristuslujuudet taulukkona sekä graafisesti.

Taulukko 4. Ensimmäisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys.

Puristuslujuudet N/mm <sup>2</sup>						
Resepti nro	Pvm	Valuaika klo	4h	8h	12h	24h
1	22.6.2010	13.10	0,00	0,38	3,46	12,62
2	22.6.2010	14.45	0,00	0,59	1,71	8,51
3	22.6.2010	11.30	0,22	2,75	5,75	10,01
4	22.6.2010	13.40	0,00	0,70	7,85	20,12
5	22.6.2010	15.15	0,00	0,89	6,65	15,80
6	22.6.2010	12.00	0,31	4,90	9,01	11,06
7	22.6.2010	16.35	0,00	0,00	8,27	21,95
8	22.6.2010	14.20	0,00	1,62	12,80	24,80
9	22.6.2010	16.05	0,00	0,53	2,90	18,61
10	22.6.2010	12,35	1,35	7,92	11,45	13,05



Kuva 26. Ensimmäisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys kuvaajana

## Viimeiset laboriokokeet

Taulukko 5. Viimeisen laboratoriosarjan reseptit.

Resepti 1			kg		
Sementtilaatu	Pika		15		
Kiviaines			15		
Lisäaine	SPRUT NA 43		0,45		
Vesi			9		
W/C	=	0,6	Massan lämpötila valun aikana 26	H/C	= 1

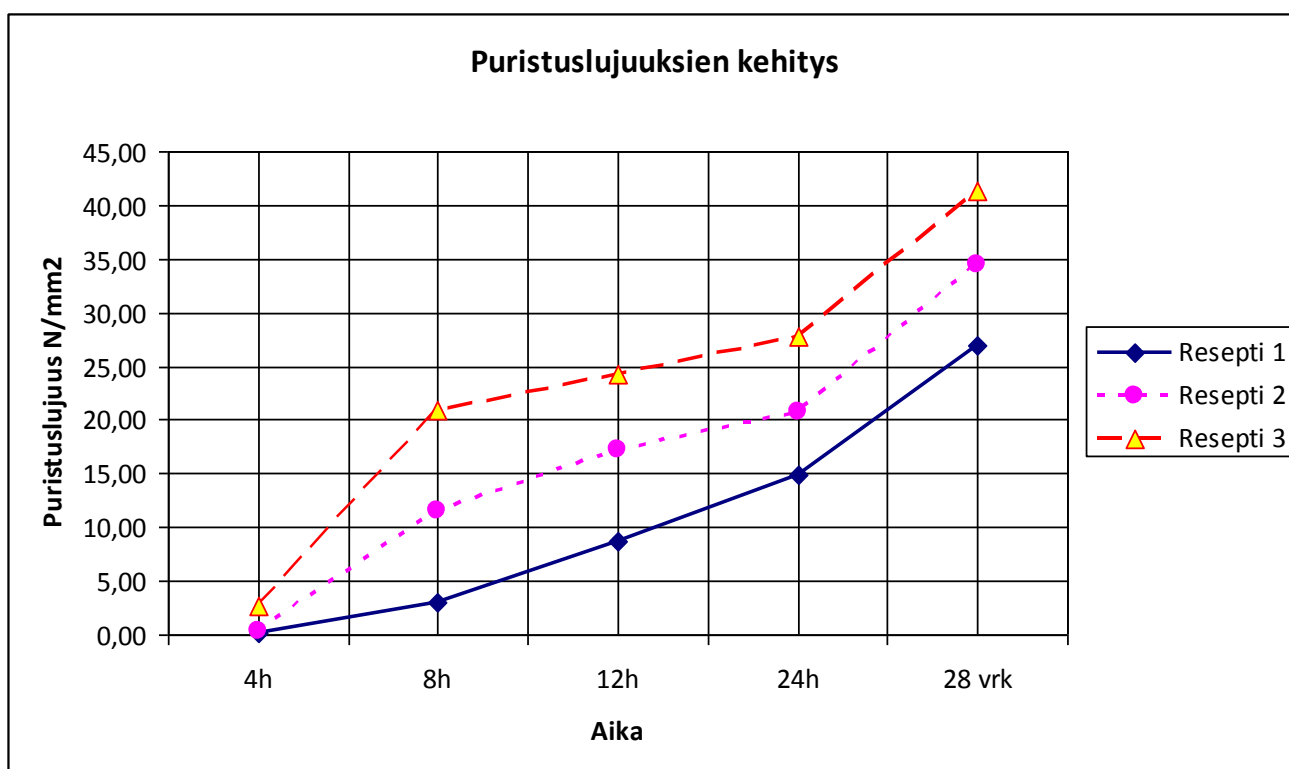
Resepti 2			kg		
Sementtilaatu	Pika		20		
Kiviaines			12		
Lisäaine	SPRUT NA 43		0,6		
Vesi			10		
W/C	=	0,5	Massan lämpötila valun aikana 26	H/C	= 0,6

Resepti 3			kg		
Sementtilaatu	Pika		25		
Kiviaines			10		
Lisäaine	SPRUT NA 43		0,75		
Vesi			11,25		
W/C	=	0,46	Massan lämpötila valun aikana 26	H/C	= 0,4

Taulukko 6. Viimeisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys.

Puristuslujuudet N/mm <sup>2</sup>								
Resepti nro	Pvm	Valuaika klo	4h	8h	12h	24h	28 vrk	Huom.
1	3.11.2010	8.45	0,20	3,00	8,70	14,90	26,99	norm.
2	3.11.2010	9.10	0,40	11,60	17,30	20,80	34,50	norm.
3	3.11.2010	9.40	2,70	20,90	24,30	27,70	41,30	norm.

Taulukossa 5 havainnollistetaan käytettyjen osa-aineiden keskinäisiä suhteita. Muutettaessa osa-aineiden välisiä painosuhteita muuttuvat samalla myös tilavuudet. Tämä johtaa eri määriin painoyksiköissä joka reseptissä haettaessa tiettyä tilavuutta sekoitetulle massaerälle. Taulukossa käytetty kirjainyhdistelmä H/C tarkoittaa runkoaineuksen ja sementin suhdetta. Taulukko 6 selventää ja tarkentaa mitattuja puristuslujuuksia eri reseptien koekuutioille.



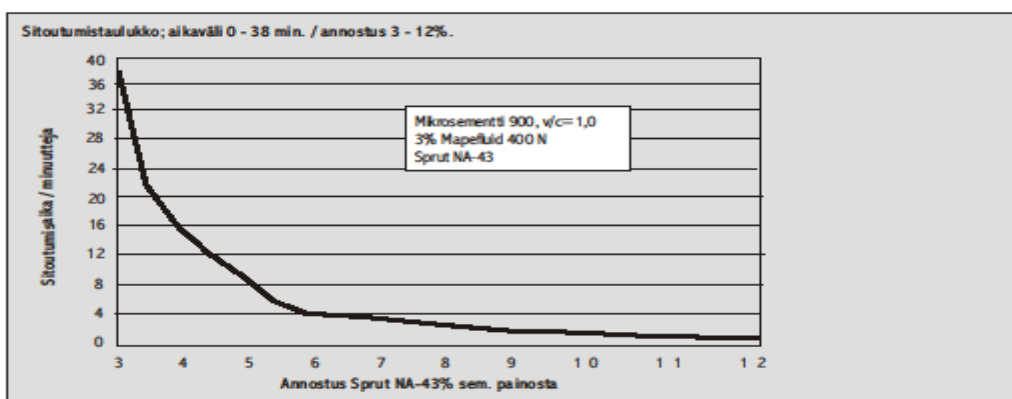
Kuva 27. Viimeisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys kuvaajana.

#### 4.4.1 Käytetty lisäaine

Sprut NA-43 on nestemäinen kiihdytin ruiskubetonointiin sekä erityisesti mikrosementti-injektointiin. Tuote koostuu modifioiduista natriumsilikaattiyhdisteistä. Annostuksesta riippuen voidaan sementin sitoutumisaikaa säätää halutun mukaiseksi. Sprut NA-43 lisää puristuslujuutta, mutta liiallinen annostus vähentää loppulujuutta. Normaali annostus on 2 - 12 % sementin painosta. Kuvassa 28 on eritelty lisäaineen ominaisuudet valmistajan määrittelemänä. Viimeisessä laboratoriosarjassa lisäaineen annostusta alennettiin verrattuna ensimmäiseen sarjaan. Lisäaineen annostuksen alentaminen johtui työmaalla juotettujen koeputtien juotosmassan hieman liian nopeasta sitoutumisesta. Liian nopea sitoutuminen aiheutti pientä tarttumista myllyn seinämiin massan ominaisuuksista johtuneen lyhyen tauon aikana. Kuva 29 esittää lisäaineen annostuksen vaikutuksen sitoutumisaikaan. /7/

OMINAISUUDET	
Ominaispaino	1,43 kg/l
Olomuoto	neste
Väri	kirkas
Haju	ei ominaishajua
PH-arvo	noin 11
Kuiva-ainepit.	56 %
Annostus	2-12% sem. Painosta
Pakkaus	26,6 kg/1430kg
Varastointi	ei saa jäättyä
Säilyvyys	12 kk

Kuva 28. Sprut NA-43, ominaisuudet /7/



Kuva 29. Sprut NA-43, sitoutumisaikataulukko /7/



#### **4.4.2 Vesi-sementtisuhte**

Ensimmäisessä laboratoriosarjassa oli kaikissa resepteissä vesi-sementtisuhteena 0,6. Toisessa laboratoriosarjassa vesi-sementtisuhdetta muutettiin kaikkiin kolmeen reseptiin massan oikean koostumuksen löytämiseksi. Käytetyt vesi-sementtisuhteet olivat 0,6, 0,5 ja 0,46.

#### **4.4.3 Sementin ja runkoaineen välinen suhde**

Sementin ja hiekan välistä suhdetta muutettiin radikaalisti toisessa laboratoriosarjassa johtuen liian suuren suhteen huonosta soveltumisesta työmaalla käytettäviin laitteisiin. Oikeanlaista suhdetta haettiin kolmella reseptillä välillä 1,0–0,4.

#### **4.5 Koekappaleiden testisarjat**

Laboratoriosarjoissa pyrittiin selvittämään pääasiassa ensimmäisen vuorokauden puristuslujuuksien kehitystä. Ensimmäisessä laboratoriosarjassa koekappaleet puristettiin 4 h, 8 h, 12 h ja 24 h ikäisinä, toisessa sarjassa puristettiin edellä mainittujen lisäksi myös 28 vrk:n puristuslujuus loppulujuuden selvittämiseksi. Toisessa laboratoriosarjassa haettiin myös massalle optimaalista koostumusta käsiteltävyyden suhteen, jotta massa olisi koostumukseltaan riittävän sitkeää pysyäkseen pystysuoraan ylöspäin suuntautuvissa rei'issä.

### **5 TULOSTEN ANALYSOINTI**

Ensimmäinen laboratoriosarja tuotti varsin mielenkiintoisia tuloksia. Yllättävin tulos oli mielestäni sitoutumisen alkaminen erittäin nopeasti valamisen jälkeen ja tämän jälkeen lujuuden nopea kehittyminen huolimatta erittäin korkeasta vesi-sementtisuhteesta. Saatujen tulosten perusteella valittiin jatkokehitykseen resepti jossa sementtinä oli Pikasementti ja lisääineena Sprut NA-43. Kyseinen massa saavutti lujuuden  $f_{ck, cube}$  8 MN/m<sup>2</sup> kahdeksassa tunnissa.

Työmaalla suoritettu koejuottaminen toi ilmi selkeän ongelman massan koostumuksessa. Massassa oli liikaa hiekkaa suhteessa sementtiin, mikä aiheutti massaletkun tukkeutumisen johtuen hiekan aiheuttamasta tulpasta liittimessä. Myös veden ja sementin keskinäinen suhde oli väärä. Massa oli aivan liian vetelää kestääkseen yläkätisissä rei'issä. Käytetyn lisäaineen annostus oli myös liian korkea. Vaikka käytettiin annostusskaalan lähes alarajalla ollutta painosuhdetta suhteessa sementin painoon (4 %), oli annostus silti liian korkea. Massa tarttui hieman kiinni betonimyllyn seinämiin lyhyen, hiekan letkuun tekemän tulpaa aiheuttaman tauon takia. Koepulttien juottaminen sujui muuten ongelmitta. Huolimatta runkoaineen suuresta määrästä juotosmassassa upposivat pultit kuitenkin käsivoimin reikiin. Kahdeksan tunnin kuluttua juottamisesta räjäytettiin lähimmillään 10 metrin päässä juotetusta pultista viiden metrin pituinen tunneliperä. Räjäytys aiheutti heilahdusnopeuden summavektorin korkeimmaksi arvoksi 112,97 mm/s. Mittapisteeltä MP1 ei tärinän taajuutta voitu mitata johtuen laajaskaalaisesta mittausanturista. 20 metrin etäisyydellä räjäytetystä perästä mittauspisteessä MP2 tärinän aiheuttama summavektorin suurin heilahdusnopeus oli enää 47,7 mm/s tärinän taajuuden ollessa alimmillaan pystykomponentissa 228 Hz. Räjäytysten tärinöiden heilahdusnopeuksien summavektorit suhteessa etäisyyteen esitetty graafisesti kuvassa 2, s.14 28 vuorokauden kuluttua koepulttien juottamisesta suoritettiin vetokokeet. Vetokokeessa käytetty vetotunkki oli kalibroitu maksimissaan 120 kN voimalle. Pultit mittauspisteillä MP1 ja MP4 tunkattiin edellä mainitun tunkin maksimivoimalla. Tunkkaus ei aiheuttanut pultteihin silmämääräisesti tarkasteltuna minkäänlaista reaktiota.

Viimeisessä laboratoriosarjassa keskityttiin kehittämään massan ominaisuuksia edelleen paremmin työmaalle soveltuvaksi. Kolmessa eri reseptissä muokattiin vesi-sementtisuhdetta, vesi-runkoainessuhdetta sekä alennettiin sementin ja lisäaineen keskinäistä suhdetta yhdellä painoprosentilla kolmeen prosenttiin. Vesi-sementtisuhteen alentaminen vaikuttaa massan loppulujuutta kasvattavana tekijänä sekä tekee massasta sitkeämpää ominaisuudeltaan. Sementin ja runkoaineen välisen suhteen pienentäminen vaikutti myös massan sitkeyttä parantavasti. Lisäaineen annostuksen alentaminen ei huomattavissa määrin vaikuttanut massan käsiteltävyyteen. Prosentin vähentäminen annostuksesta

mahdollistaa kuitenkin pidemmän käsittelyajan juotettaessa, joten kyseinen muutos reseptiin oli ehdottoman perusteltu.

Sprut NA-43, myöhemmin NA-43, on kehitetty varsinaisesti käytettäväksi ruis-kubetonin sekä injektointimassan kiihdyttimenä. NA-43 toimi kuitenkin ominaisuuksiensa puolesta erinomaisesti myös juotosmassan kiihdyttimenä. Tarvittu sitoutumisen alkamisen nopeuttaminen saavutettiin lähes minimiannostuksella eli 3 painoprosentilla suhteessa sementin painoon. Käytettäessä näin pientä lisäaineannostusta, ei loppulujuuden kehittymisen kanssa ollut ongelmia, vaan loppulujuus kehittyi riittäväksi huolimatta lisäaineesta. NA-43 teki massasta myös käsiteltävyyden puolesta erinomaista. Massa pysyi erittäin hyvin koossa ja näin ollen myös pystysuoraan ylöspäin suuntautuvien reikien juottaminen onnistuu helposti.

Viimeisen laboratoriosarjan paras massa oli tehty reseptin 3 mukaan. Kyseisessä reseptissä oli sarjan alin vesi-sementtisuhde 0,46, joka osaltaan vaikutti loppulujuuteen sekä lujuuden kehittymisen nopeaan alkamiseen valun jälkeen. Reseptissä oli myös sementtiä 2,5-kertaisesti runkoainekseen verrattuna. Koostumukseltaan massa oli notkeudeltaan erinomaista käytettäväksi myös suoraan ylöspäin suuntautuviin reikiin mutta silti helposti pumpattavaa. Kyseinen resepti saavutti RIL 253–2010:ssa esitetyn  $f_{ck,cube}$  5 MN/ m<sup>2</sup> alle kuudessa tunnissa loppulujuuden ollessa 41 MN/ m<sup>2</sup>. Loppulujuus ylittää InfraRYL 2006 vaaditun K35-2 - luokan  $f_{ck,cube}$  35 MN/ m<sup>2</sup>. Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon laboratorion lämpötila, jossa koekuutiot sitoutuivat. Laboratoriossa vallitsi molempien sarjojen valun aikana tasainen +19 °C lämpötila. Aikaisemmin tehtyjen tutkimuksien mukaan lämpötilan noustessa 10 °C lyhenee sitoutumisaika noin puoleen /8/. Kenttäkokeiden tekohetkellä tunnelin kalliomassan lämpötila oli keskimäärin 12 °C, joten tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia laboratoriokokeiden ja kenttäkokeiden kesken. Viimeisen laboratoriosarjan resepti 3 saavutti lujuuden 21 MN/m<sup>2</sup> kahdeksassa tunnissa, josta voidaan päätellä massan saavuttavan samassa ajassa lujuuden 10 MN/m<sup>2</sup> tunneliolosuhteissa kalliomassan lämpötilan ollessa +9 °C.

## 6 PÄÄTELMÄT

Tutkimuksen tulokset osoittavat kehitetyn juotosmassan soveltuvan hyvin kallio-rakenteen lujittamiseen juotosmassalla juotetuilla harjateräspulteilla myös koh-teissa, joissa louhintaa ei voida keskeyttää työvuoroa pitemmäksi ajaksi. Kehi-tetty juotosmassa mahdollistaa louhinnan jatkumisen pultatun kohteen välittö-mässä läheisyydessä jo kahdeksan tunnin kuluttua juottamisesta. Laboratorio-olosuhteissa reseptillä saavutettiin räjäytykset pultituskohteen välittömässä lä-heisyydessä mahdollistava lujuus jo alle kuuden tunnin sitoutumisella, mutta tunneliolosuhteissa on huomioitava kalliomassan laboratoriota alhaisempi, si-toutumista hidastava lämpötila.

Kyseisen massan käyttö asettaa pulttausta suorittavalle henkilöstölle haasteita lyhyehkön sitoutumisajan. Käytettäessä kehitettyä reseptiä on kaluston väli-pesuista sekä muottiöljyllä suojaamisesta huolehdittava erittäin tarkasti. Jos edellä mainittuja toimenpiteitä ei suoriteta tasaisin väliajoin, on vaarana massan sitoutuminen sekoittajaan, massapumppuun sekä työalustaan.

Työturvallisuuden näkökulmasta katsottuna massa asettaa omat haasteensa työntekijöiden suojarustukselle. Vahvasti emäksinen massa aiheuttaa silmiin tai iholle joutuessaan vaurioita, joten riittävään suojavaatetukseen on kiinnitet-tävä huomiota. Valmistettaessa kehitettyä massaa tai asennettaessa pulttia rei-kään on ehdottomasti käytettävä hyväksyttyjä suojalaseja, pitkävartisia kumi-hanskoja sekä riittävän suojan antavaa suojavaatetusta.

Suosittelava juotosmassan reseptin koostumus:

- Pikasementtiä (Finnsementti Oy) 1 painoyksikkö
- Hiekkaa Ø 0,5 - 2,5 mm 0,4 painoyksikköä
- Vettä 0,46 painoyksikköä
- Kiihdytin Sprut NA-43 (Rescon Mapei) 3% sementin painosta

Suosittelava sitoutumisaika juottamisen ja pultituskohteen välittömässä lähei-syydessä räjäyttämisen välillä on kahdeksan tuntia.

## KUVAT

Kuva 1. Juotoslaastin kiviaineksen rakeisuuskäyrän vaihtelualue /2/, s.7

Kuva 2. Mitattujen heilahdusnopeuksien yhdistetty summavektori, s.14

Kuva 3. Ensimmäisen räjäytyksen aiheuttamat heilahdusnopeudet eri etäisyyksillä, s.15

Kuva 4. Toisen räjäytyksen aiheuttamat heilahdusnopeudet eri etäisyyksillä, s.15

Kuva 5. Mittauspisteen MP1 anturi asennettuna kallioon, s.16

Kuva 6. Anturi MP1 sekä anturin kaapeli asennettuna suojaputkeen, s.16

Kuva 7. Mittauspisteen MP1 anturi suojattuna Larssen-pontin taakse, s.17

Kuva 8. Mittauspisteen MP4 anturi asennettuna ja suojattuna Larssen-pontilla, s.17

Kuva 9. Mittauspiste MP1 räjäytyksen jälkeen. Kaapelin suojaputki suojattiin 0-32 - murskeella ennen räjäytystä, s.18

Kuva 10. MP1, ensimmäinen räjäytys, s.19

Kuva 11. MP1, toinen räjäytys, s.20

Kuva 12. MP2, ensimmäinen räjäytys, s.21

Kuva 13. MP2, toinen räjäytys, s.22

Kuva 14. MP3, ensimmäinen räjäytys, s.23

Kuva 15. MP3, toinen räjäytys, s.24

Kuva 16. MP4, ensimmäinen räjäytys, s.25

Kuva 17. MP4, toinen räjäytys, s.26

Kuva 18. Lämpötilaseurannan tulokset, s.27

Kuva 19. Lämpötilaloggeri, s.29

Kuva 20. Lämpötilaloggerin anturikaapeli sekä koepultti juotettuna mittauspisteellä MP4, s.29

Kuva 21. Juotettu koepultti mittauspisteellä MP2, s.31

Kuva 22. Koevetolaitteen tunkki asennettuna testipultin päähän mittauspisteellä MP4, s.32

Kuva 23. Koevetolaitteen pumppuosa, jossa kiinteä painemittari, s.32

Kuva 24. Putzmeister-monitoimilaite, jossa tasosekoittaja sekä massapumppu, s.33

Kuva 25. Laboratoriossa käytetty tasosekoittaja, s.34

Kuva 26. Ensimmäisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys kuvaajana, s.38

Kuva 27. Viimeisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys kuvaajana, s.39

Kuva 28. Sprut NA-43, ominaisuudet. /7/, s.40

Kuva 29. Kuva 29. Sprut NA-43, sitoutumisaikataulukko /7/, s.40

## **TAULUKOT**

Taulukko 1. Kovettuvaan betoniin kohdistuvan tärinän ohjearvo /4/, s.12

Taulukko 2. Lämpötilamittauksen tulokset kahden tunnin välein, s.28

Taulukko 3. Ensimmäisten laboratoriokokeiden reseptit, s.35

Taulukko 4. Ensimmäisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys, s.37

Taulukko 5. Viimeisen laboratoriosarjan reseptit, s.38

Taulukko 6. Viimeisen laboratoriosarjan massojen puristuslujuuksien kehitys, s.39

## **LÄHTEET**

[1] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. RIL 154–2. 1987. Tunneli- ja kalliorakennus 2.

[2] Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedonanto 27. 1977. Kalliopulttien asennus ja laadunvalvonta.

[3] Rakennustietosäätiö RTS. InfraRYL 2006. 2006.

[4] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. RIL 253–2010. 2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät.

[5] Suomen Betoniyhdistys ry. Betoninormit 2004 by50. 2004.



[6] Finnsementti Oy, Suomalainen sementtiopas.

[7] [www.resconmapei.fi](http://www.resconmapei.fi) luettu ja viitattu 5.1.2011

[8] Havukainen, M. 2009. Kalkkikiviseossementeistä valmistettujen betonien karbonatisoitumisen tutkiminen. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Rakenustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.